

1	EINLEITUNG	1
1.1	AUFGABENSTELLUNG UND ZIELSETZUNG	1
2	CORIOLIS EFFEKT	2
3	FUNKTIONSPRINZIP	4
3.1	EINROHRSYSTEME	4
3.1.1	U -ROHR- SYSTEME	4
3.1.2	GERADES-EINROHRSYSTEM	10
3.2	DOPPELROHRSYSTEM	16
3.3	VERGLEICH MIT ANDEREN MESSVERFAHREN	18
4	MECHANIK UND MATERIALIEN	20
4.1	FREQUENZEN DER ANREGENDEN KRAFT	20
4.2	MESSROHRWANDSTÄRKEN	20
4.3	VIBRATIONEN	21
4.4	BENETZTE MATERIALIEN	21
4.5	NENNWEITEN UND FREIE QUERSCHNITTE	22
4.6	UNTERSCHIEDLICHE BAUFORMEN	24
4.7	DRUCKVERLUSTE	26
4.8	GASEINSCHLÜSSE IN DER FLÜSSIGKEIT	30
5	PHYSIKALISCHE GRENZEN VON MASSENDURCHFLUSSMESSGERÄTEN	31
5.1	MESSFEHLER / MESSUNSICHERHEITEN	31
5.2	MESSGENAUIGKEIT BEI VERSCHIEDENEN BAUFORMEN UND EINBAUORTEN	32
6	TRANSMITTER	33

7	SIGNALERZEUGUNG UND SIGNALERFASSUNG	34
7.1	SENSORSPANNUNG IN DER ZEITDARSTELLUNG	34
8	AUFBAU DES VERSUCHSSTANDES	35
8.1	ANFORDERUNGEN	35
8.2	BAUTEILE DES LOOPS	36
8.2.1	TROCKENLÄUFERPUMPE	36
8.2.2	DIFFERENZDRUCKMESSER	37
8.2.3	CORIOLIS-MASSDURCHFLUSSMESSGERÄT	38
8.2.4	WIDERSTANDSTHERMOMETER / PT100	39
8.3	DRUCKLUFTSEITE DER VERSUCHSANLAGE	40
8.3.1	SCHWEBEKÖRPER-DURCHFLUSSMESSER	40
8.4	SCHALTSCHRANK	42
9	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	43
9.1	VORBEREITUNGEN	43
9.1.1	ARBEITSSCHRITTE BEIM BEFÜLLEN DES LOOPS	43
9.1.2	VORBEREITUNGEN ZUR DATENAUFNAHME	43
9.1.3	ABLAUF EINER MESSUNG	44
10	MESSWERTAUFNAHME	45
	BILD 10.04: ZEIGT DAS SINTERMATERIAL MIT LUFTDURCHSÄTZEN	46
10.1	DIAGRAMME	47
10.2	VERSUCHSAUSWERTUNG DER FEHLERKURVEN	56
10.2.1	ABWEICHUNGEN DES MASSENSTROMS	56
10.2.2	ABWEICHUNGEN DER GEMESSENEN DICHTEN	58
11	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	60

12 ANHANG	61
12.1 LITERATURVERZEICHNIS	61
12.2 VERWENDETE ZEICHEN UND EINHEITEN	63
12.3 EXELTABELLEN	64
12.4 ZEICHNUNGEN	71
12.4.1 ELEKTROSCHALTPLAN	71
KLEMMLEISTENPLAN	72

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Massendurchflussmesser, die nach dem Coriolis-Prinzip arbeiten, sind mittlerweile im Markt weitverbreitet. Eine große Zahl von Anbietern offeriert die unterschiedlichsten Geräteausführungen, die oft aus patentrechtlichen Gründen hinsichtlich des mechanischen Aufbaus stark voneinander abweichen. Anders als die traditionellen Durchflussmessverfahren, die über die Fließgeschwindigkeit oder das Volumen den Durchfluss ermitteln, erfassen die Coriolis-Durchflussmesser den Massendurchfluss eines Produktes direkt. Masse ist der einzige physikalische Parameter, der von anderen physikalischen Größen wie Temperatur, Druck, Viskosität, Dichte oder Reynoldszahl unbeeinflusst bleibt. Die Masse eines Stoffes ist aus verschiedenen Gründen ein bevorzugter Parameter in der industriellen Messtechnik. Eine chemische Reaktion zwischen zwei oder mehreren Stoffen beispielsweise läuft aufgrund von masse- bzw. -mol.-massebezogenen Gleichungen ab. Als Verrechnungsgröße ist die Masse eines Produktes die einzige gültige Größe, da das Volumen bei Temperaturänderung und Druckänderung variiert, die Masse hingegen konstant bleibt. Stöchiometrische Bilanzen sind wichtige Hilfsmittel bei der Beurteilung chemischer Verfahren. Ebenso dienen Massemessungen oft als Abrechnungsgrundlage im Geschäftsverkehr.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll, in Zusammenarbeit mit der Fa. Endress & Hauser, ein neuer Versuchsstand zur Durchflussmessung mittels Coriolismassemessgeräten aufgebaut und Inbetrieb genommen werden. Desweiteren soll das Verhalten der Messgeräte in einer Zwei-Phasen-Strömung (Wasser / Luft) hinsichtlich ihrer Genauigkeit, bei kontrollierter Eindüsung verschiedener Luftvolumina und Massenströmen untersucht werden. Die aufgenommenen Werte werden auf einen Rechner übertragen und können mittels einer Software in Diagrammform ausgewertet und diskutiert werden.

Zielsetzung dieser Diplomarbeit ist es, wenn möglich, eine Aussage darüber zu treffen, wie sich verschiedenen Luftmengen bzw. verschiedene Verhältnisse von Wasser zu Luft auf die Messgeräte auswirken und ob man Aussagen treffen kann, wie die Messungenauigkeiten bei verschiedenen Zuständen am besten behoben werden können.

2 Coriolis Effekt

Der Coriolis-Effekt wurde zuerst als mechanische Erscheinung bei Drehbewegungen und infolge der Erddrehung von dem französischen Physiker Coriolis entdeckt. Dem Physiker Jean Leon Foucault blieb es vorbehalten, diesen Effekt in eindrucksvoller Weise 1851 in der Kuppel des Invalidendoms in Paris zu demonstrieren.

Ein 67 m langes Pendel wurde von der Coriolis-Kraft abgelenkt und die Schwingungsebene rotierte um $11^{\circ}15'$ in der Stunde. Mit anderen Worten, die Erde drehte sich unter dem Pendel weg. Man bezeichnet diesen Effekt auch als Coriolis-Kraft und dazu gehört eine Coriolis-Beschleunigung. Auf der Erde läßt sich die Coriolis-Kraft bei der Entstehung und Ausbreitung von Hoch- und Tiefdruckgebieten beobachten.

In nördlichen Breitengraden wird die Luft in Tiefdruckgebieten nach links abgelenkt. Dies führt zu einer Drehung der Wolkenwirbel gegen den Uhrzeigersinn wie es das Bild 2.01 deutlich zeigt. Auf der Südhalbkugel finden die gegenläufigen Drehbewegungen eines solchen Wolkenwirbels statt.

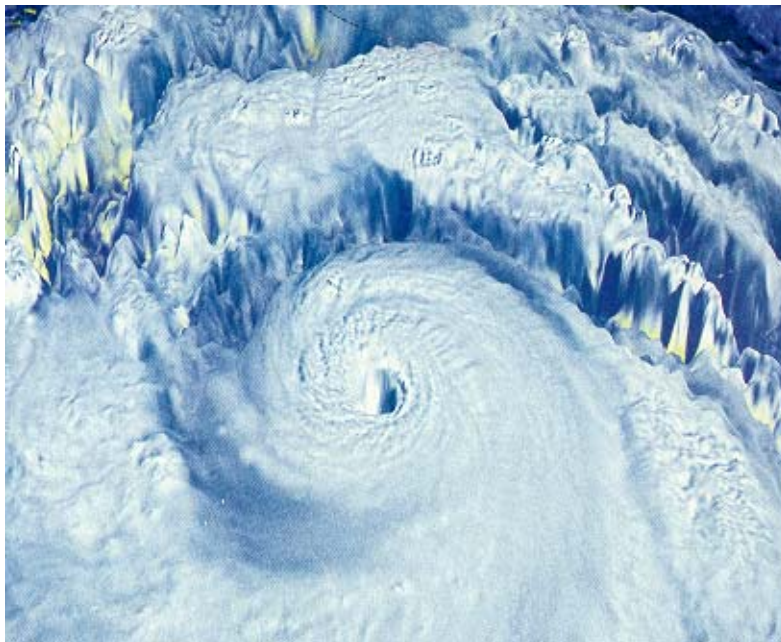


Bild 2.01 : Darstellung eines Tiefdruckgebietes /1/

Zur Erklärung des Effekts betrachten wir Bild 2.02. Ein Körper oder Teilchen bewegt sich mit der Geschwindigkeit v auf einer Bahn vom Mittelpunkt einer drehenden Scheibe mit der Rotationsfrequenz ω zum Rand.

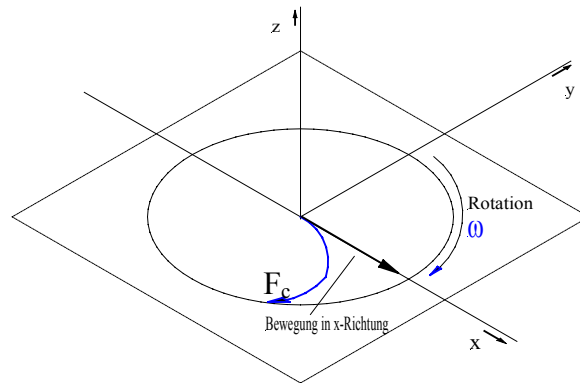


Bild 2.02: Coriolis-Effekt hervorgerufen durch eine Rotationsbewegung und eine geradlinige Bewegung

Im Gegensatz zu Hochdruckgebieten erfolgt die geradlinige Bewegung bei Tiefdruckgebieten in das Zentrum hinein.

Senkrecht zur Bahngeschwindigkeit wirkt die Corioliskraft F_C , welche nach dem französischen Physiker Gaspard Gustave de Coriolis (1792-1843) benannt worden ist und durch eine Winkelgeschwindigkeit ω beschrieben werden kann.

$$F_C = -m2\vec{\omega} \times \vec{v} \quad (2.01)$$

oder um den Massenstrom darzustellen

$$F_C = -2\vec{\omega} \times \vec{q}_m . \quad (2.02)$$

Wir sehen hier, dass die Masse des bewegten Körpers von Bedeutung ist. Im Falle der Coriolismassemesser soll gerade das q_m bestimmt werden. Aus einer bekannten Kraft und der Winkelgeschwindigkeit ω lässt sich so der Massenstrom angeben.

3 Funktionsprinzip

3.1 Einrohrsysteme

3.1.1 U-Rohr- Systeme

Alle bisher bekannten Versionen arbeiten nach dem gleichen Messprinzip¹. Sie setzen Messrohre ein, die elektromagnetisch in Schwingung versetzt werden, um die bei einer durch das Rohr strömenden Masse verursachten Coriolis-Kräfte auswerten zu können.

Die mechanischen Hauptkomponenten des unten in Bild 3.01 abgebildeten U-Messrohres sind das Messrohr und die Prozessblöcke, an die das Messrohr angeschlossen ist.

Das Messrohr ist an den Prozessblöcken befestigt, wie ein frei hängender Träger. Das Messrohrsystem weist zwei Achsen auf.

Die erste Achse „O“ ist die Rotationsachse. Dies ist die Achse, um die das Messrohr schwingt bzw. rotiert. Die andere Achse ist die Drehachse „R“. Eine Rotation um diese Achse ist abhängig von der Masse, die durch das Messrohr fließt.

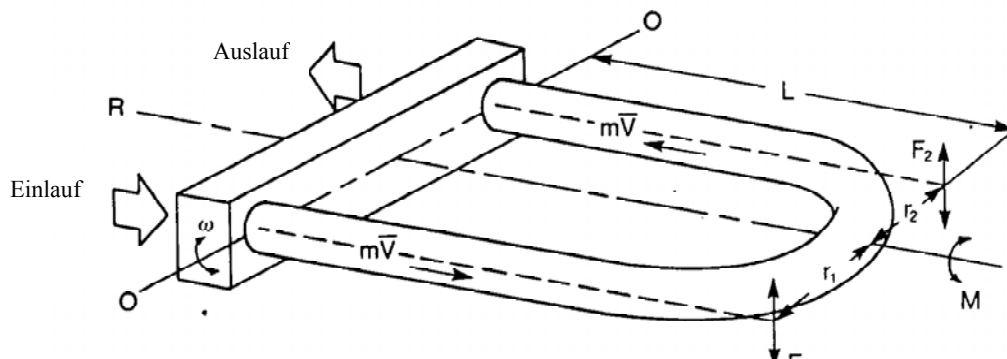


Bild 3.01: Komponenten des Massedurchflussmessers /2/

¹(Bonfig, et al. 1987) Handbuch für Ingenieure, Sensoren und Meßwertaufnehmer expert verlag

Die gesamte Flüssigkeit in einem Rohrleitungssystem, an dem das Messgerät angeschlossen ist, fließt über die Prozessblöcke und das Messrohr. Die zylindrischen Abschnitte wie sie in Bild 3.02 dargestellt sind, stellen eine Masseneinheit dar, die sich durch das Rohr bewegt. Die normale Fließrichtung ist, wie in diesem Bild 3.02 angedeutet, die rechte Seite „Einlauf“ und die linke Seite „Auslauf“. Diese Fließrichtung wird auch in den folgenden Beschreibungen und Abbildungen beibehalten.

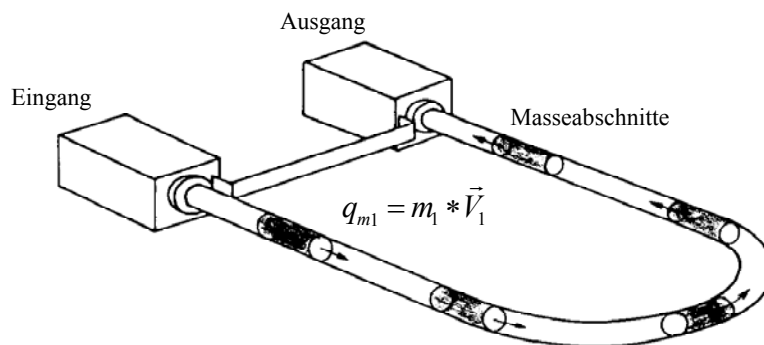


Bild 3.02: Masseabschnitte fließen durch das U-förmige Messrohr /2/

Die Schwingungsamplituden der Messrohre liegen unter 0,1mm. Grundsätzlich gilt wiederum, je größer das Gerät, desto größer sind die Schwingungsamplituden.

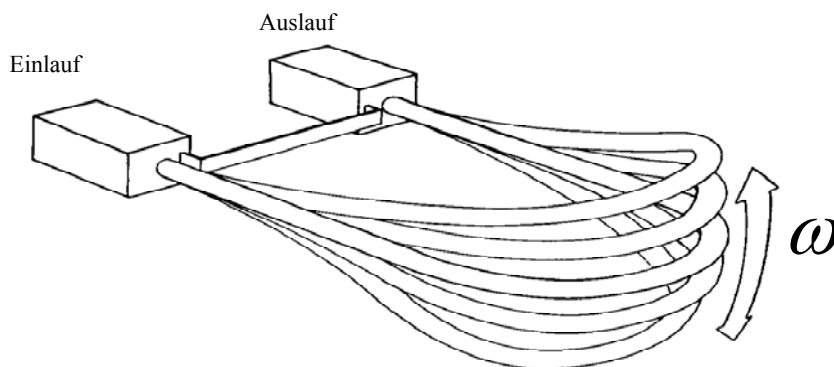


Bild 3.03: Schwingbewegung des Messrohres ohne strömendes Medium /2/

Bild 3.04 zeigt die Bewegung eines Flüssigkeitsabschnittes in der Einlaufseite des Messrohres in Verbindung mit der Schwingung, hier dargestellt in der Aufwärtsbewegung. Während der Aufwärtsbewegung des Messrohres fließt der Flüssigkeitsabschnitt mit einer konstanten Fließgeschwindigkeit von der Schwingachse in Richtung U-Bogen weiter. Diese Fließbewegung ist hier angedeutet durch Pfeile in Fließrichtung.

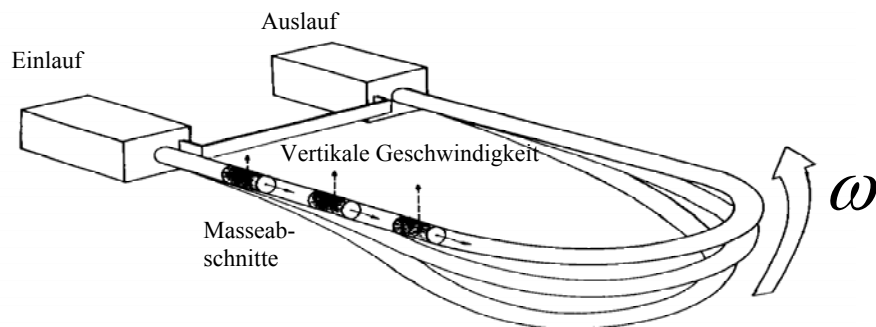


Bild 3.04 : Vertikale Beschleunigung wirkt auf die Masseabschnitte /2/

Durch die Aufwärtsbewegung des Messrohres, wie in Bild 3.04 beschrieben, erfährt auch die Flüssigkeit, die sich innerhalb des Rohres befindet, eine vertikale Beschleunigung und besitzt damit eine Geschwindigkeit, die durch gestrichelte Pfeile angedeutet ist. Die auf die Flüssigkeitspartikel wirkende vertikale Beschleunigung steigt von der Drehachse zum U-Bogen hin in der Einlaufseite an. Die Änderung der vertikalen Beschleunigung wie sie typischerweise an einem rotierenden Körper auftritt und in Bild 3.05 dargestellt ist, wird auch Coriolis-Beschleunigung genannt. In diesem Fall ist der rotierende Körper das Messrohr. Die Coriolis-Beschleunigung ist dargestellt durch strichpunktierte Pfeile.

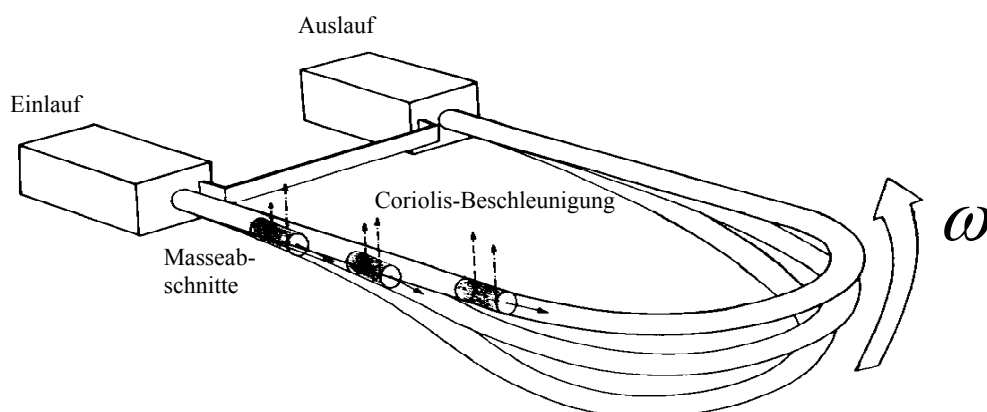


Bild 3.05: Aus vertikaler Beschleunigung resultierende Coriolis-Beschleunigung /2/

Da das Messrohr durch seine Bewegung einseitig auf die Flüssigkeit drückt, wirkt diese andererseits zurück auf das Rohr. Nach dem dritten Newtonschen Gesetz gilt, dass für jede Kraftwirkung eine gleiche Wirkung in Gegenrichtung erfolgt wie in Bild 3.06 zu sehen ist. Diese Gegenwirkung bewirkt in dem Messrohr eine Verlangsamung oder Abbremsung des Rohres auf der Einlaufseite in vertikaler Richtung. Die auf die Flüssigkeit in der Einlaufrohrseite einwirkende Gegenkraft ist äquivalent zum Betrag der Masse, die sich in der Einlaufrohrseite befindet, multipliziert mit der vertikalen Beschleunigung, wie man in Bild 3.06 erkennen kann.

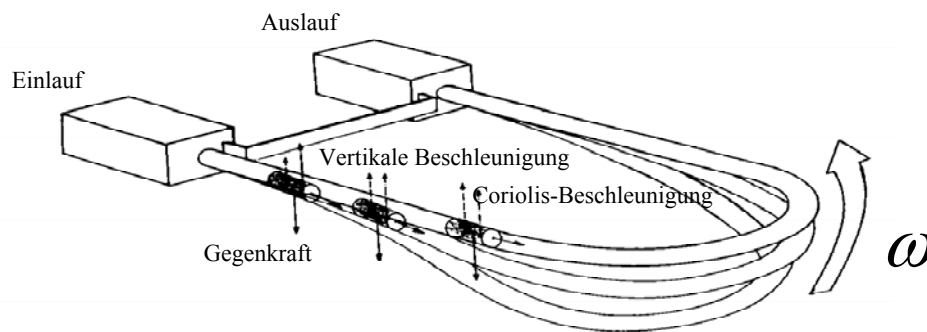


Bild 3.06 : Die der Coriolis-Beschleunigung entgegen wirkende Kraft, wird durch die nach unten zeigenden Pfeile dargestellt /2/

In der Auslaufrohrseite nimmt die vertikale Geschwindigkeit der Flüssigkeit vom U-Bogen hin zur Schwingachse „O“ ab. Somit ist also die Drehgeschwindigkeit des Messrohres an dem am weitesten von der Drehachse entfernten Punkt ebenfalls am größten. Die Drehgeschwindigkeit des Rohres nimmt aber in Richtung auf den Auslauf gesehen ab. Fließt nun der Flüssigkeitsabschnitt von einem Punkt des Rohres, der sich schneller bewegt, zu einem Punkt, der sich langsamer bewegt, wird die Flüssigkeit, in vertikaler Richtung gesehen, abbremsst. Die Verringerung bzw. Abbremsung der Drehgeschwindigkeit ist durch die gestrichelten Pfeile in Bild 3.07 dargestellt.

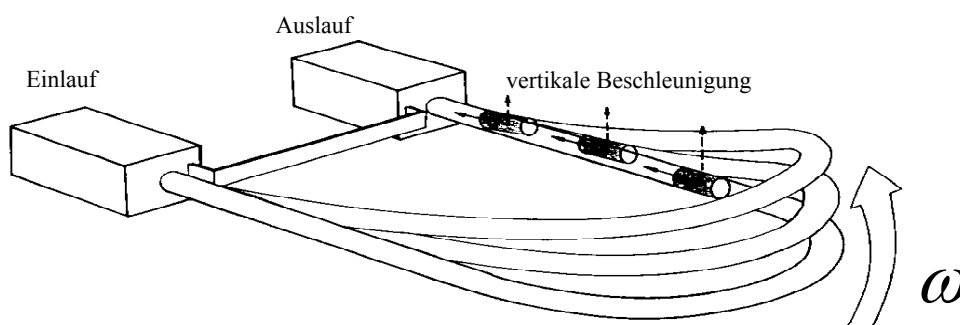


Bild 3.07: Abnehmende vertikale Beschleunigung im Auslauf-Rohrschenkel /2/

Da die Flüssigkeit, in vertikaler Richtung gesehen, verlangsamt wird, wirken Kräfte der sich verlangsamenen Flüssigkeit auf die Oberseite des Meßrohres. Die Flüssigkeit drückt zurück auf das Rohr und beschleunigt dieses in Richtung der Rohrbewegungsrichtung. Das Ergebnis der auf den Ein- und Auslaufrohrschenkelseiten entgegengesetzt wirkenden Kräfte ist eine Verdrehung des Messrohres um die Drehachse „R“.

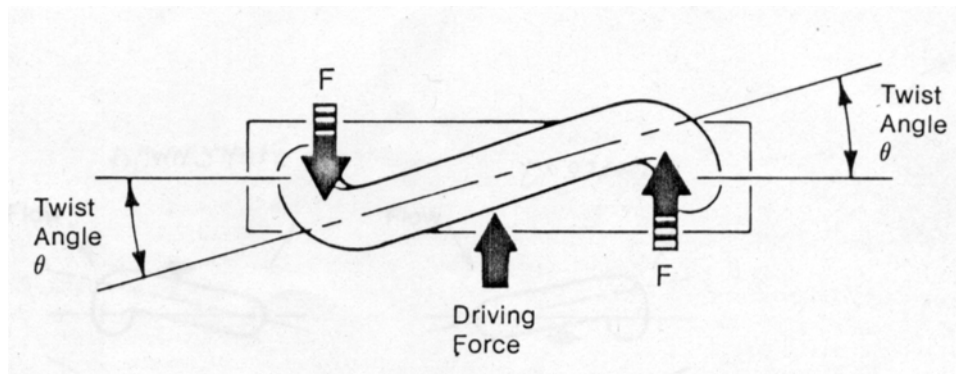


Bild 3.08: Verdrehung des Messrohres durch die Coriolis-Beschleunigung in der Aufwärtsbewegung /4/

Die Größe des entstehenden Drehwinkels ist direkt proportional zur Massendurchflussmenge durch das Messrohr. Durch Messung des auftretenden Drehwinkels erhält man ein massedurchflussproportionales Messergebnis. Die Herleitung einer Bestimmungsgleichung für den Massenstrom aus den relevanten Parametern ist für das U-Rohr-System besonders einfach, wenn man Drehmomente und Torsionskräfte berücksichtigt, welche in Bild 3.01 und 3.08 dargestellt sind.

$$F_C = m2\vec{\omega} \times \vec{v} \quad (3.01)$$

Das Moment M setzt sich aus den Kräften F_1 und F_2 , sowie aus den Abständen r_1 und r_2 zusammen, (vergl. Bild 3.01)

$$M = F_1 r_1 + F_2 r_2 \quad (3.02)$$

da die Kräfte und die Abstände gleich groß sind, können sie wie folgt zusammen gefasst werden.

$$M = 2Fr = 4m\vec{\omega} \times \vec{v} \quad (3.03)$$

Wenn man davon ausgeht, dass die Masse „m“ definiert ist, als

$$m = \delta AL \quad (3.04)$$

die Geschwindigkeit „V“

$$\vec{V} = L / t \quad (3.05)$$

und der Durchsatz „q_m“,

$$q_m = m / t \quad (3.06)$$

dann erhält man durch Substitution dieser Formeln :

$$q_m = m \vec{V} / L . \quad (3.07)$$

Die Formel 3.07 kann jetzt in Formel 3.03 eingesetzt werden und man erhält,

$$M = 4\vec{\omega} r q_m L \quad (3.08)$$

wobei „L“ die Länge des U-Rohrschenkels ist.

Das Torsionsmoment kann auch definiert werden als

$$M = K_s \theta \quad (3.09)$$

Daraus folgt die Gleichung

$$q_m = \frac{K_s \theta}{4\omega r L} \quad (3.10)$$

mit K_s = Steifigkeitskonstante

θ = Torsionswinkel

Das zur Erklärung der Wirkungsweise dargestellte Bild 3.08 ist insofern missverständlich, als es implizieren könnte, dass der Drehwinkel, der ein Maß für die Corioliskraft und damit auch für den Massenfluss ist, auch wirklich gemessen wird. Gemessen wird vielmehr statt des Drehwinkels die dazu proportionale Phasenverschiebung² der Sensorsignale am Ein- und Auslaufschenkel.

² Darstellung und Erläuterung der Phasenverschiebung in Kapitel 7

3.1.2 Gerades-Einrohrsystem

Im Gegensatz zum U-Messrohr wird ein gerades Messrohr gerne dann benutzt, wenn das Rohr eingespannt gereinigt werden oder leer laufen muss. Die für das Messsystem erforderliche Drehbewegung des Rohres wird durch die Schwingung des Rohres realisiert. Eine Kraftquelle bewegt ein Rohrstück zwischen zwei festen Einspannungen senkrecht zur Flussrichtung.

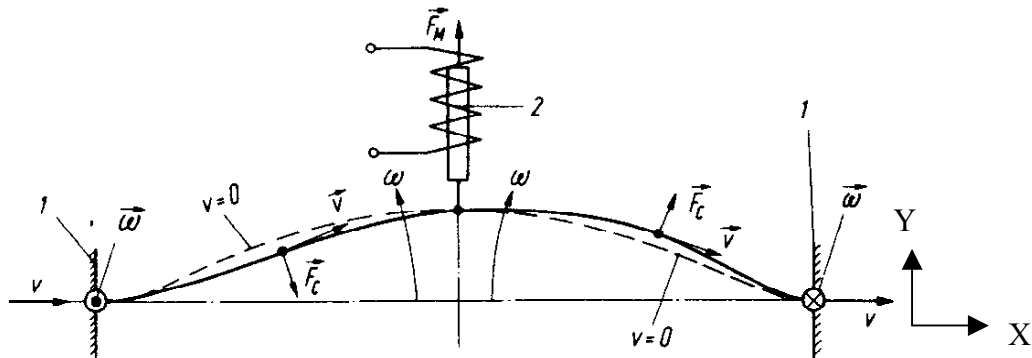


Bild 3.09 : Prinzip der Erzeugung einer Drehbewegung und der Wirkung der Corioliskraft beim Geraden-Rohr-System /4/

1 feste Einspannung des Rohres; 2 Elektromagnet für Auslenkung des elastischen Rohres (periodisch) (F_M magnetische Kraft)
 gestrichelte Linie : Auslenkung bei Strömungsgeschwindigkeit $v = 0$;
 ausgezogene Linie : Auslenkung bei Strömungsgeschwindigkeit $v \neq 0$
 F_c = Coriolis-Kraft; ω = Winkelgeschwindigkeit

Bild 3.09 zeigt schematisch die Auslenkung mit Hilfe eines Elektromagneten und die Wirkung der Corioliskraft bei der Aufwärtsbewegung des Messrohres. Die Auslenkung erfolgt symmetrisch zur Mitte, wenn der Messstoff ruht (gestrichelte Linie), und unsymmetrisch, wenn eine Strömung vorhanden ist (ausgezogene Linie).

Im linken einlaufenden Teil verursacht die Corioliskraft ein Zurückbleiben und im rechten auslaufenden Teil ein Vorlaufen des Rohres. Die Differenz wird mit elektromagnetischen Wegsensoren gemessen. Die Sensoren sind außen am Rohr montiert, so daß der Messstoff unberührt bleibt. Um den Energieaufwand zur Rohrauslenkung klein zu halten, stimmt man die Erregerfrequenz auf die Eigenfrequenz des Rohres samt Messstoff ab.

3.1.2.1 Mathematische - und physikalische Beschreibung

Zur genauen Analyse des Messverfahrens müssen wir allerdings die zugehörigen Differentialgleichungen³ lösen. Wir betrachten dazu den Ortsvektor \vec{r} , welcher von den drei bekannten Raumkoordinaten x, y, z abhängt. Damit läßt sich die allgemeine inhomogene Differentialgleichung in Vektorform angeben.

$$A\ddot{\vec{r}} + B\dot{\vec{r}} - C\vec{r} = -m2\vec{\omega} \times \dot{\vec{r}} \quad (3.11)$$

Die Gleichung ist aufgebaut aus der allgemeinen Schwingungsgleichung mit Dämpfung und dem inhomogenen Teil der Coriolis-Kraft.

Ein schwingendes System mit Federkraft und Anregung durch eine äußere, harmonische, periodische Kraft wird durch folgende Gleichung dargestellt:

$$m\ddot{x} + \beta\dot{x} - kx = F_0 \cos \omega t. \quad (3.12)$$

Mit den Ersetzungen für die Koeffizienten, $2\gamma = \beta/m$; $\omega_0^2 = k/m$; $f_0 = F_0/m$ erhalten wir,

$$\ddot{x} + 2\gamma\dot{x} - \omega_0^2 x = f_0 \cos \omega t \quad (3.13)$$

Die Berechnung von $x(t)$ erfolgt durch Lösen der homogenen und inhomogenen Differentialgleichung 2. Ordnung

Wird jedoch die Corioliskraft mitberücksichtigt, so muß die Gleichung 3.13 mit Gleichung 3.11 modifiziert werden. Wir erhalten als Vektorgleichung

$$\ddot{\vec{r}} + 2\gamma\dot{\vec{r}} - \omega_0^2 \vec{r} = -2\vec{\omega} \times \dot{\vec{r}} + f_0 \cos \omega t \quad (3.14)$$

Wir betrachten schon zu Beginn einige Randwertbedingungen, um so die Gleichung zu vereinfachen. Die Schwingungen des angeregten Systems verlaufen in y-Richtung mit der anregenden Schwingung ω in z-Richtung. Die zusätzlich auftretende Geschwindigkeit, welche zum Coriolis-Effekt führt, verläuft entlang der x-Achse.

³ Skript Prof. Dr. J. Goeke

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \ddot{y} \\ 0 \end{pmatrix} + 2\gamma \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{y} \\ 0 \end{pmatrix} - \omega_0^2 \begin{pmatrix} 0 \\ y \\ 0 \end{pmatrix} = 2\omega_z v_x + f_0 \cos \omega t \quad (3.15)$$

Durch geschickte Wahl der Koordinaten wurde aus einem Gleichungssystem in Abhängigkeit vom Ortsvektor eine zeitabhängige inhomogene Differentialgleichung in quasi eindimensionaler Darstellung. Die Glieder von $(x)t$ sind vernachlässigbar.

$$\ddot{y} + 2\gamma\dot{y} - \omega_0^2 y = 2\omega_z v_x + f_0 \cos \omega t \quad (3.16)$$

Die Drehbewegung aus der Corioliskraft läßt sich in die x und y Komponenten zerlegen.

$$\omega_z = \frac{v_x}{r} \cos \omega t + \frac{v_y}{r} \sin \omega t \quad (3.17)$$

Wir verwenden die Ableitungen für die entsprechenden zeitabhängigen Geschwindigkeiten.

$$\omega_z = \frac{\dot{x}}{r} + \frac{\dot{y}}{r} \quad (3.18)$$

Die Strömungsgeschwindigkeit v_0 sei bei unserer Betrachtung konstant. Als Differentialgleichung 2. Ordnung mit zwei Störgliedern erhalten wir,

$$\ddot{y} + 2\gamma\dot{y} - \omega_0^2 y = 2v_0 \left(\frac{\dot{x}}{r} + \frac{\dot{y}}{r} \right) + f_0 \cos \omega t \quad (3.19)$$

Das 1. Störglied, welches die Corioliskraft repräsentiert, enthält zwei Dämpfungskomponenten in x-Richtung als auch in y-Richtung. Die Dämpfungskomponente in x-Richtung $2v_0 \dot{x}$ wird durch die starre Einspannung des Rohres in zwei Flansche aufgefangen und wirkt sich in verschwindendem Maße nur auf die Strömungsgeschwindigkeit aus. Wir wollen diesen Teil bei unserer Betrachtung vernachlässigen.

Die Dämpfungskomponente in y-Richtung allerdings wirkt sich sowohl auf die Amplitude als auch auf die Phase des schwingenden Systems aus. Hier können wir bereits erkennen, dass die Strömungsgeschwindigkeit v_0 einen messbaren Einfluß hat. Die Dgl. vereinfacht sich somit auf eine eindimensionale zeitabhängige Form.

$$\ddot{y} + 2\left(\gamma - \frac{v_0}{r}\right)\dot{y} - \omega_0^2 y = f_0 \cos \omega t$$

$$\ddot{y} + 2\delta \dot{y} - \omega_0^2 y = f_0 \cos \omega t \quad (3.20)$$

Die homogene Lösung ist bekannt. Zur Berechnung der inhomogenen Lösung wählen wir den allgemeinen Ansatz:

$$y_{Stör.} = a_1 \sin \omega t + a_2 \cos \omega t \quad (3.21)$$

Wird dieser Ansatz in die Dgl. eingesetzt erhalten wir,

$$\text{I.} \quad y_{Stör.} = a_1 \sin \omega t + a_2 \cos \omega t$$

$$\text{II.} \quad \dot{y}_{Stör.} = a_1 \omega \cos \omega t - a_2 \omega \sin \omega t$$

$$\text{III.} \quad \ddot{y}_{Stör.} = -a_1 \omega^2 \sin \omega t - a_2 \omega^2 \cos \omega t$$

$$\omega_0^2 (a_1 \sin \omega t - a_2 \cos \omega t) + 2\delta\omega (a_1 \cos \omega t - a_2 \sin \omega t) - \omega^2 (a_1 \sin \omega t + a_2 \cos \omega t) = f_0 \cos \omega t$$

Die harmonischen Anteile von Sinus und Kosinus werden zusammengefasst.

$$(a_1 \omega_0^2 - 2\delta a_2 \omega - a_1 \omega^2) \sin \omega t + (2\delta \omega a_1 - a_2 \omega_0^2 - a_2 \omega^2) \cos \omega t = f_0 \cos \omega t$$

Daraus lassen sich 2 Bedingungen ableiten und durch Koeffizientenvergleich die Konstanten bestimmen.

$$\text{I.} \quad (\omega^2 a_1 - 2\delta a_2 - a_1 \omega_0^2) \sin \omega t = 0 \quad \text{und}$$

$$\text{II.} \quad (2\delta \omega a_1 - a_2 \omega_0^2 - a_2 \omega^2) \cos \omega t = f_0 \cos \omega t$$

Aus der I. Bedingung erhalten wir

$$a_1(\omega^2 - \omega_0^2) - 2\delta \omega a_2 = 0$$

$$a_2 = \frac{a_1(\omega^2 - \omega_0^2)}{2\delta \omega} \quad \text{oder} \quad a_1 = \frac{a_2 2\delta \omega}{\omega^2 - \omega_0^2}$$

Für die II. Bedingung ergibt sich

Das Ergebnis aus Bedingung I. können wir in den harmonischen Teil der Bedingung II. einsetzen.

$$\begin{aligned}
 2\delta\omega a_1 - a_2(\omega^2 - \omega_0^2) &= f_0 \\
 2\delta\omega a_1 - a_1 \frac{(\omega^2 - \omega_0^2)^2}{2\delta\omega} &= f_0 \\
 a_1 \left[2\delta\omega - \frac{(\omega^2 - \omega_0^2)^2}{2\delta\omega} \right] &= f_0 \\
 a_1 &= f_0 \left[\frac{(2\delta\omega)^2 - (\omega^2 - \omega_0^2)^2}{(2\delta\omega)^2} \right]
 \end{aligned}$$

Damit erhalten wir für die inhomogene Lösung folgende Form:

$$y_{Stör.}(t) = f_0 \left[\frac{2\delta\omega}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4\delta^2\omega^2} \sin \omega t - \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4\delta^2\omega^2} \cos \omega t \right] \quad (3.22)$$

Für die homogene Lösung Gl.3.15 erhalten wir:

$$y_{Hom.}(t) = e^{-\gamma t} \left[\frac{2\delta\omega}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4\delta^2\omega^2} \sin \sqrt{(\omega^2 - \delta^2)} t + \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4\delta^2\omega^2} \cos \sqrt{(\omega^2 - \delta^2)} t \right]$$

Die Gesamtlösung erhalten wir aus der Addition des homogenen wie des inhomogenen Teils. Der homogene Teil der Lösung repräsentiert das Einschwingverhalten und ist für den Dauerbetrieb des schwingenden Systems uninteressant. Wir wollen daher die inhomogene Lösung noch einmal betrachten und versuchen einen vereinfachten Ausdruck zu finden. Mit Hilfe des Additionstheorems⁴ läßt sich die Gleichung 3.22 umformen.

⁴ Allgemein erhalten wir aus dem Additionstheorem:

$$A \sin \omega t + B \cos \omega t = \sqrt{A^2 + B^2} \cos(\omega t + \varphi) \quad \text{mit} \quad \tan \varphi = \frac{B}{A}$$

Die Lösungsfunktion des Störgliedes repräsentiert den eingeschwungenen Zustand des Systems. Alle am System beteiligten Kräfte und Bewegungen sind dort vertreten, wobei die Schwingung des Rohres der anregenden Kraft F_0 mit einer Phasenverschiebung φ folgt.

$$y_{Stör.}(t) = \frac{f_0}{\sqrt{4(\gamma - \frac{v_0}{r})^2 \omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2}} \cos(\omega t - \varphi) \quad (3.23)$$

$$\text{mit} \quad \varphi = \arctan \frac{-2(\gamma - \frac{v_0}{r})\omega}{\omega^2 - \omega_0^2} \quad (3.24)$$

Mit Hilfe der beiden Gleichungen 3.23 und 3.24 erhalten wir ein Gleichungssystem mit dessen Hilfe sich die Unbekannte q_m errechnen läßt. Damit können wir q_m in Abhängigkeit der relevanten Parametern angeben. Unter der Annahme der Max-Amplitude für $y_{(Stör.)}$ erhalten wir durch Umformen aus Gleichung 3.23,

$$\frac{f_0^2}{A_{\max}^2} - (\omega^2 - \omega_0^2)^2 = 4 \left(\frac{\beta}{m} - \frac{v_0}{r} \right)^2 \quad (3.25)$$

$$q_m = 2\beta + \frac{m}{\omega} (\omega^2 - \omega_0^2) \tan \varphi \quad (3.26)$$

3.2 Doppelrohrsystem

Das mechanische Verhalten dieser Einzelrohre kann auch auf Systeme mit Doppelrohraufbau übertragen werden.

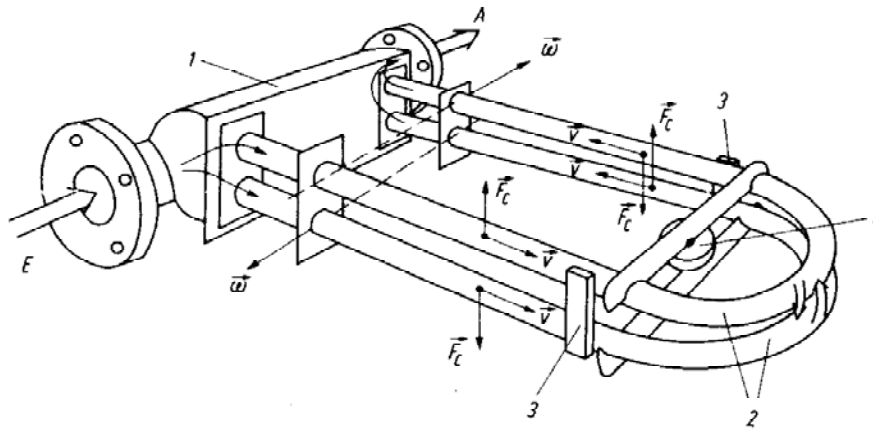


Bild 3.10: Räumliche Darstellung eines Doppelrohrsensors /6/

E = Einlauf; A = Auslauf;

1 Einspannung; 2 parallelliegende U-Rohre; 3 Rohrlagesensor; 4 Antriebsspule mit Rohrbündel; ω = Vektor der Winkelgeschwindigkeit (Drehachse); v = Strömungsgeschwindigkeit;

F_c = Coriolis-Kraft

Jedes einzelne Messrohr arbeitet in gleicher Art und Weise, wie es bei dem Einzelrohr beschrieben wurden. Beide Rohre schwingen entgegengesetzt zueinander mit einer Phasenverschiebung von 180° . Sie arbeiten in ähnlicher Weise wie die Zinken einer Stimmgabel.

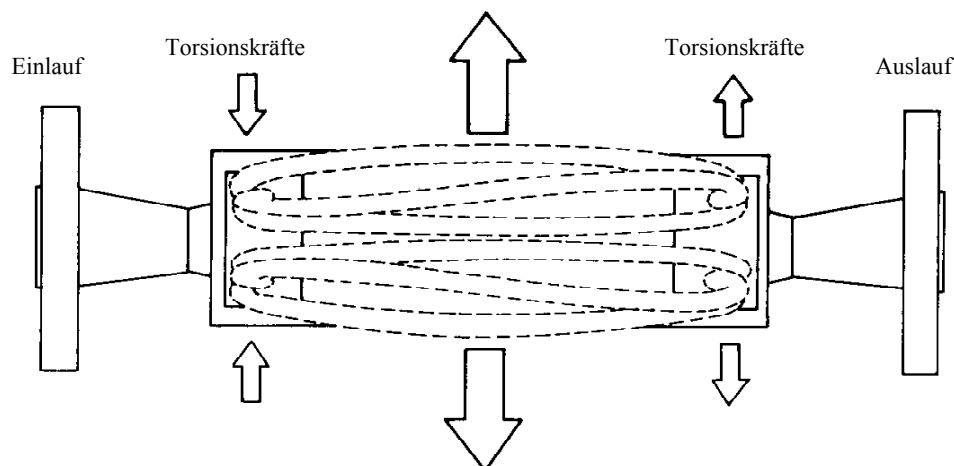


Bild 3.11: Verdrehung der Rohre beim Doppelrohrsensor /2/

Durch die entgegengesetzte Schwingungsrichtung der Rohre werden Vibrationsprobleme durch Ausgleich der Scher- und Drehmomentkräfte am Drehpunkt weitestgehend vermieden. Betrachtet man die Doppelrohrversion wie in Bild 3.11 beschrieben vom U-Bogen her, sieht man, dass beide Messrohre bei strömendem Medium eine entgegengesetzte Drehbewegung ausführen. Das obere Rohr bewegt sich aufwärts, und deshalb dreht es sich gegen den Uhrzeigersinn. Das untere Rohr dreht sich im Uhrzeigersinn, da es sich abwärts bewegt. Während des Messprozesses werden die Drehwinkel von beiden Rohren summiert. Für den Messprozess soll hier noch angemerkt werden, dass der größte Drehwinkel ansteht, wenn die beiden Messrohre ihre normale Ruhelage, die Nullachse, passieren. An diesem Punkt wird auch der Messwert für den Drehwinkel aufgenommen.

3.3 Vergleich mit anderen Messverfahren

In diesem Unterkapitel wird auf die Funktionsweise und den Einsatzbereich des thermischen Massenstrommessers eingegangen und letzterer mit dem Coriolismassenstrommesser verglichen. Bei thermischen Massenstrommessern wird die Abkühlung eines Widerstandsdrahtes oder Dünnschichtwiderstandes aus Platin oder Wolfram ausgewertet, der sich unmittelbar im Flüssigkeitsstrom befindet und durch einen Speisestrom beheizt wird. Diese Abkühlung hängt von der Dichte des Stoffes und seiner Strömungsgeschwindigkeit ab. Gemessen werden kann nun entweder die Änderung der Temperaturdifferenz zwischen Widerstand und Fluid bei konstantem Speisestrom oder der Speisestrom, der notwendig ist, um eine konstante Temperaturdifferenz zwischen Fluid und Widerstand einzustellen.

Die Messung bei konstanter Temperatur zeichnet sich durch eine bedeutend kürzere Einschwingzeit aus. Wie man aus Bild 3.12 erkennen kann, ist die Kennlinie des thermischen Massenstrommessers stark gekrümmt. Sie weist die größte Empfindlichkeit im Bereich niedrigerer Durchflussraten aus. Dadurch ergibt sich eine hohe Messgenauigkeit auch bei kleineren Durchflüssen, welche Massendurchflussmesser, die nach dem Coriolisprinzip arbeiten, in dieser Art und Weise nicht besitzen.

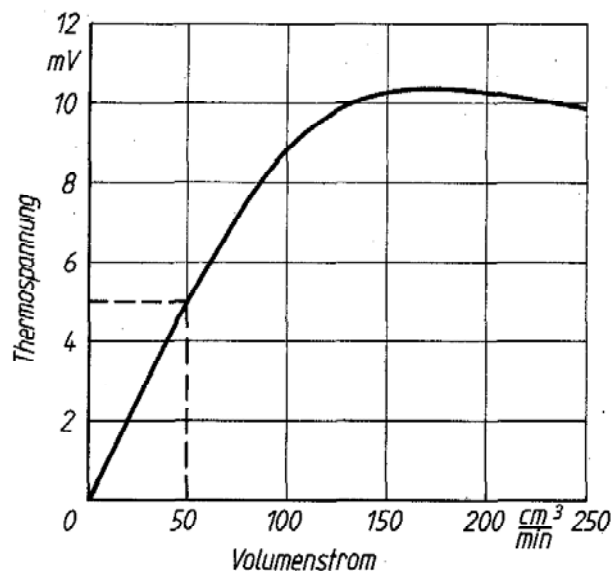


Bild 3.12: Kennlinie eines thermischen Massedurchflussmessers /4/

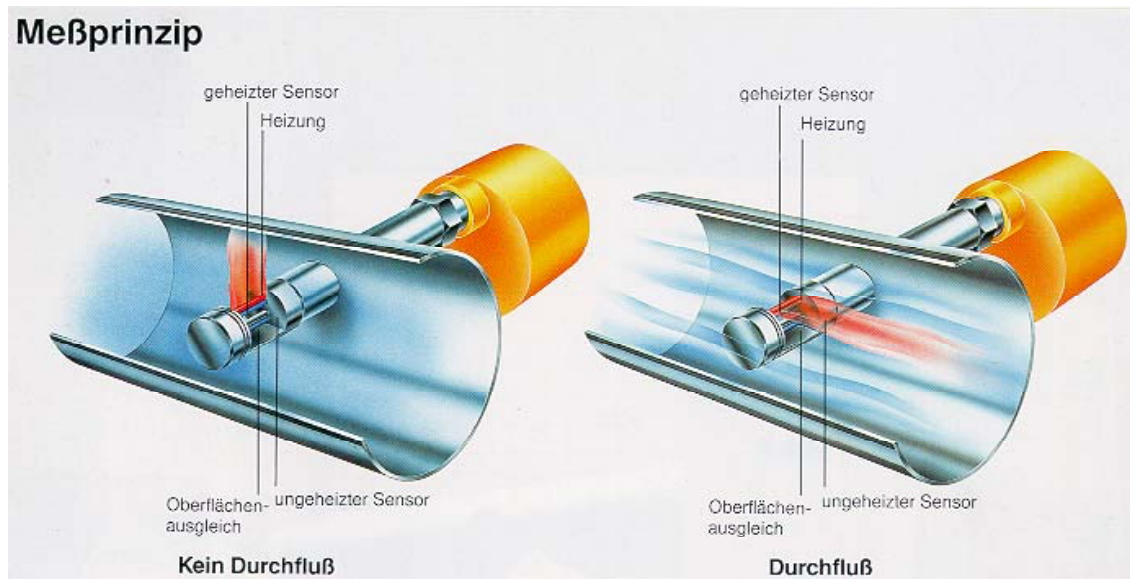


Bild 3.13: Zeigt das Meßprinzip eines thermischen Massedurchflussmessers /3/

Beurteilung:

- teure Eichung bei hochwertigen Gasen.
- es muß mit dem Messgas unter Messbedingungen geeicht werden.
- hohe Empfindlichkeit des Sensors, durch Änderung der Strömungsart (laminar / turbulent) leicht zu stören.
- bei der Messung von Gasen ist das System Dichte und Temperatur abhängig, d.h. es müssen immer gleiche Betriebsbedingungen herrschen.
- hohe Empfindlichkeit gegenüber Verschmutzungen und Beschädigungen.

Wie man an Hand dieser Nachteile erkennen kann, ist die thermische Massenstrommessung der Messung, welche auf dem Coriolisprinzip beruht, weit unterlegen. Nicht nur hinsichtlich des Aufwandes den man treiben muss, um Messungen erst durchführen zu können, sondern auch um diese Messung vernünftig beenden zu können. Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt ist die Messgenauigkeit (2% von Mittelwert bzw. 0,5% vom Endwert), welche nicht im entferntesten an die des Coriolismassensensors (0,5% von Mittelwert bzw. 0,005% vom Endwert) herankommt.

4 Mechanik und Materialien

4.1 Frequenzen der anregenden Kraft

Das Messrohr wird in seiner natürlichen Resonanzfrequenz⁵ über eine magnetisch-induktive Antriebseinheit in Schwingung versetzt. Die Frequenzen, mit der die Rohre schwingen, liegen zwischen 60 und 1000 Hz, diese Werte können von Hersteller zu Hersteller stark variieren und sind abhängig von der Größe der Meßrohre.

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass je größer das Gerät ist, desto niedriger ist die Frequenz. Frequenzen nahe dem Bereich 50-60 Hz werden vermieden, um Störungen von normalen elektrischen Antrieben und Anlagenteilen auszuschließen. Der mit bis zu 0,5mm eng begrenzte Bereich für die Schwingungsamplitude beim U-Rohr-System vermeidet übermäßige Materialbeanspruchung in der Nähe der Schwingungsachse. Bei der geraden Rohrsymmetrie liegt die Schwingungsamplitude sogar niedriger als 0,1mm. Die Schwingbelastung liegt somit weit unterhalb der Materialelastizitätsgrenze von z.B. Edelstahl, Titan, Hastelloy C oder Tantal. Die Vibrationen der Messrohre bei ihrer Resonanzfrequenz minimiert die notwendige Energie, um das Rohr in Schwingung zu halten.

4.2 Messrohrwandstärken

Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt ist die Wandstärke der jeweils eingesetzten Messrohre. Neben den eingesetzten Messrohrmaterialien hat auch die Rohrwandstärke einen direkten Einfluß auf die Steifigkeit, sprich auf die Flexibilität der Rohre. Die Flexibilität der Rohre wiederum ist bei Biegeschwingern verantwortlich für die Ansprechempfindlichkeit des Messwertaufnehmers. Je flexibler ein Rohr also ist, desto größer ist die Auslenkung und desto besser läßt sich eine große Signalamplitude erzielen, auswerten und auflösen. Bei gleicher Rohrgröße und Rohrgeometrie erhöht also eine dünnere Rohrwandung den Messeffekt. Da auch die Länge der vibrierenden Messrohre einen Einfluß auf die Messempfindlichkeit hat, kann man durch eine geschickte Messrohrgeometrie unter Beibehaltung möglichst starker Messrohrwandungen einen vergleichsweise großen Messeffekt erzielen, ohne dass die Gesamtabmessungen eines Messwertaufnehmers durch die messwirksame Rohrlänge aus dem üblichen Rahmen fallen.

⁵ Karl Walter Bonfig, Sensor und Sensorsysteme, expert verlag 1991

In diesem Fall würde sich das U-Rohr-System anbieten. Messwertaufnehmer mit einer stärkeren Rohrwandung können in der Regel auch für höhere Betriebsdrücke (bis 400 bar) eingesetzt werden bzw. weisen höhere Sicherheitsfaktoren gegen den Berstdruck auf.

4.3 Vibrationen

Ein oszillierendes System kann im Prinzip immer durch Vibrationen beeinflusst werden. Somit können sämtliche Coriolis-Massendurchflussmesser ab einer bestimmten Intensität von äußeren Vibrationen gestört werden.

Man kann jedoch prinzipiell sagen, dass die Empfindlichkeit eines Schwingsystems gegenüber Vibrationen um so größer ist, je kleiner das Verhältnis von Schwingungsamplitude zur Störgröße ist. Somit nimmt mit zunehmender relativer Schwingungsamplitude der Störeinfluß durch Vibrationen ab. Die Rohrwandstärke und die Form der Rohrschleife spielen hinsichtlich der Steifigkeit und der Störimpfindlichkeit des Rohres eine nicht unerhebliche Rolle, sowie die Richtung und die Frequenz der Störgröße.

4.4 Benetzte Materialien

Die meisten Hersteller liefern die Massendurchflussmesser mit Messwertaufnehmern, deren benetzte, also mit dem Produkt in Berührung kommende Teile, aus Edelstahl bestehen. In einigen Fällen werden auch Materialien, wie beispielsweise Titan, Hastelloy C oder Tantal angeboten. Dabei sollte auf jeden Fall sichergestellt werden, ob auch tatsächlich alle benetzten Teile aus diesem Material bestehen.

In allen Geräten werden neben den eigentlichen Messrohren noch weitere benetzte, also mit dem Produkt in Kontakt stehende Teile, wie z.B. Gußstücke mit Umlenkbögen, Flansche und auch in einigen Fällen Dichtungen eingesetzt. Es sollte sichergestellt werden, dass auch diese Teile die angestrebte Korrosionsbeständigkeit aufweisen.

Ein weiterer wichtiger Punkt sind Verbindungsstellen zwischen verschiedenen benetzten Materialien, beispielsweise zwischen Edelstahl und Hastelloy C oder Edelstahl und Titan. Diese sollten auch bezüglich der verwendeten Verbindungsart überprüft werden.

Das Material Titan hat beispielsweise hervorragende schwingungstechnische Eigenschaften und einen extrem niedrigeren Temperatúrausdehnungskoeffizienten, was natürlich dem Ideal der gewünschten Materialeigenschaften für Coriolis-Messwertaufnehmer entgegen kommt. Titan ist auch gut geeignet beim Einsatz unter oxidierenden Atmosphären, darunter versteht man im engeren Sinne die Verbindung eines Stoffes mit Sauerstoff. Während es im Bereich reduzierender Betriebsbedingungen, darunter versteht man den Entzug von Sauerstoff, also die Aufnahme von Elektronen, weniger gut geeignet ist. Das Material Tantal ist schon eines der besser geeigneten Materialien, die einen möglichst breiten Bereich und zwar sowohl unter oxidierender als auch unter reduzierender Atmosphäre abdecken können. Wenn Edelstahl in Bereichen eingesetzt wird, in denen man mit freiem Chlor oder anderen Halogen-Ionen rechnen muss, kann man davon ausgehen, dass es je nach Betriebsbedingung zu Lochkorrosion kommt. Bei Coriolis-Massemessern die nach den Biegeschwingprinzip arbeiten, kommt es dann an den Stellen der höchsten Biegebelastung relativ schnell zum Messrohrbruch durch Lochkorrosion. Weniger gefährdet sind Systeme bei denen die mechanische Belastung in einem Biegemodus und einem Torsionsmodus aufgeteilt wird, insbesondere auch dann, wenn gleichzeitig dickwandigere Messrohre verwendet werden.

4.5 Nennweiten und freie Querschnitte

Unter Nennweiten, definiert nach DIN, versteht man normalerweise einen bestimmten freien Rohrquerschnitt (Durchmesser) einer Rohrleitung je nach Druckstufe.

Einige Fabrikate sind mit einzelnen durchströmten Rohren, andere mit parallelen Doppelmessrohren ausgeführt. Um die Größe eines Sensors (Messwertaufnehmers) zu identifizieren, sollte man sich nicht unbedingt an den angegebenen Flansch-Nennweiten orientieren, sondern an dem jeweiligen Querschnitt des oder der Messrohre, da ein und derselbe Aufnehmertyp mit Flanschen unterschiedlicher Nennweite bestückt werden kann.

Es ist daher ratsam, nach den tatsächlichen Rohrrinnendurchmessern bzw. der freien Querschnittsfläche der Rohre zu fragen, da diese Werte nur selten in der üblichen Herstellerliteratur zu finden sind.

Man kann dabei auf Diskrepanzen wie im folgenden Beispiel stoßen:

- Herstellerangabe: Messwertaufnehmer DN 25
- Innendurchmesser (d) der zwei Meßrohre, je 11,38mm Die freie Querschnittsfläche (A) beträgt:

$$A = 2 * \frac{d^2 * \Pi}{4} = 203,6 \text{ mm}^2 \quad (4.01)$$

Dagegen beträgt die tatsächliche freie Querschnittsfläche der Flanschbohrung eines Flansches DN 25 / PN 40 (DIN 2635); $d = 28,5 \text{ mm}$; $A = 637,6 \text{ mm}^2$

Hieraus wird deutlich, dass die tatsächliche freie Querschnittsfläche dieses Sensors nur 31,8% von der tatsächlichen Fläche der Nennweite DN 25 aufweist, daraus folgt eine Geschwindigkeitserhöhung, was zu einer besseren Signalausbeute führt. Außer Acht lassen darf man aber auch nicht den Anstieg des Druckverlustes, welcher sich aus der höheren Fließgeschwindigkeit ergibt.

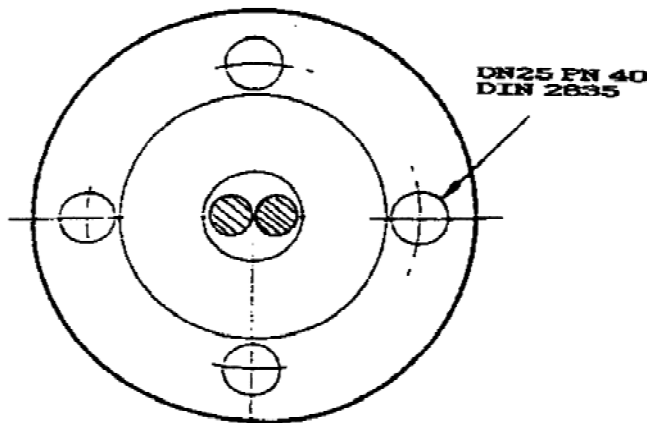


Bild 4.01: Flansch mit tatsächlichem freien Rohrquerschnitt. /7/

4.6 Unterschiedliche Bauformen

Die Messwertaufnehmer der verschiedenen Hersteller weisen im Prinzip alle eine andere Form auf. Der Grund mag auf der einen Seite in den vielen verschiedenen Patenten verschiedener Inhaber liegen, andererseits spielen aber auch funktionstechnische und andere praktische Gründe eine Rolle.

Der ideale Aufnehmer besteht aus einem einzelnen geraden Messrohr ohne Querschnittsverengung. Hierfür gelten die Idealvorstellungen, wie z.B. möglichst niedriger Druckverlust und selbsttätiges Leerlaufen. Ähnlich gut stehen zunächst Aufnehmer mit zwei parallelen geraden Messrohren da.

Doch sollte man beachten, dass die Geräte den eigentlichen Leitungsquerschnitt wie in Kapitel 4.5 beschrieben von beispielsweise 1" (DN25) erheblich reduzieren. Das hat in erster Linie funktionstechnische Gründe. Kurze gerade Rohre haben den Vorteil geringer Baugröße, haben geringere Druckverluste und die Einrohrausführung läßt sich zudem noch sehr gut reinigen, jedoch aufgrund ihrer größeren Steifigkeit haben sie den Nachteil kleinerer Durchflussfaktoren (Signal/Durchfluss-Verhältnis). Es werden also relativ hohe Fließgeschwindigkeiten benötigt, um eine entsprechende Signalstärke zu erzielen. Dies gilt auch für einige komplexere Messrohrformen wie sie in Bild 4.02, 4.03 und 4.04 abgebildet sind. Daher sollten immer wieder die Rohrquerschnittsflächen den Messbereichen und den erzielbaren Genauigkeiten gegenübergestellt werden.

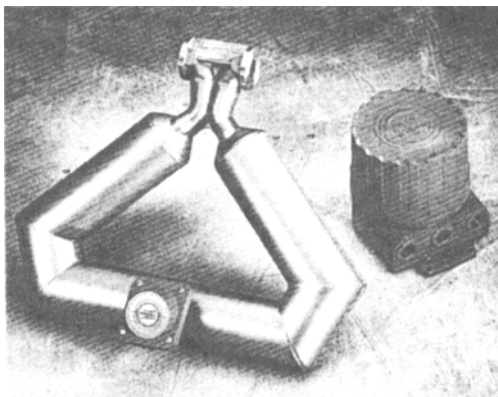


Bild 4.02: Sensor in Triangelform

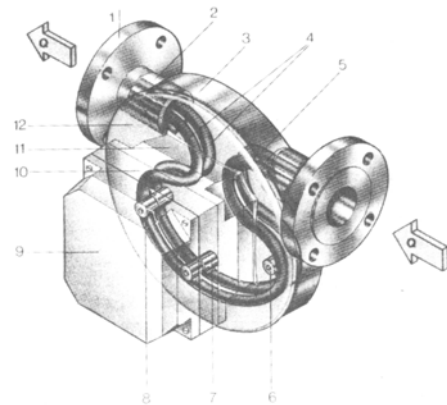


Bild 4.03: Sensor in Omegaform

Das Bild 4.02 zeigt einen Sensor der Firma Fisher-Rosemount, diese Sensorform läßt größere Amplituden bis 0,5mm zu und kann auch schwierige Messaufgaben lösen, wie z.B. das Messen von hoch viskosen Fluiden unter geringen Betriebsdrücken.

Bild 4.03 zeigt einen Sensor der Firma Heinrichs, der auch mit hohen Amplituden von etwa 0,5mm günstige Meßeffekte besonders bei niedrigeren Fließgeschwindigkeiten ermöglicht und hat damit eine hohe Messspanne und eine um den Faktor fünf bessere Nullpunktstabilität als die U-förmigen Sensoren hat.

Bei Messwertaufnehmern, die mit zwei parallelen Messrohren ausgeführt sind, ist auch die Ausführung des Strömungsteilers zu beachten. Dieses Teil dient zur Aufteilung des gesamten Produktstromes auf zwei, in der Regel kleinere Rohre und auf der Auslaufseite natürlich zur Zusammenführung der zwei Teilströme. Am strömungstechnisch günstigsten sind Gußstücke, die eine bogenförmige Umlenkung und allmähliche Aufteilung gewährleisten. Andere Strömungsteiler bestehen aus Metallblöcken, in denen die Hauptleitungsbohrung einfach mit zwei kleineren Stichbohrungen für den Messrohranschluß versehen ist. Diese Ausführung ist zwar am preisgünstigsten, jedoch nur für dünnflüssige Medien zu empfehlen. Außerdem sollte die Materialkompatibilität mit dem spezifizierten Messrohrmaterial gewährleistet sein. Die meisten Messwertaufnehmer werden mit ihrer typischen Eigenfrequenz, die sich aus der Steifigkeit (Elastizität) der Messrohre und deren Gewicht ergibt, zum Schwingen angeregt. Die Frequenz mit der ein Messwertaufnehmer schwingt, gibt indirekt auch die Vibrationsfrequenz an, auf die ein System empfindlich reagiert, wenn diese als Anlagenvibration von externer Seite eingebracht wird. Systeme mit dickwandigen, schweren Messrohren haben wesentlich mehr Energie gespeichert. Dämpfungseffekte, z.B. hervorgerufen durch Gaseinschlüsse in der Flüssigkeit, können bei solchen Systemen wesentlich besser ausgeglichen werden, wie z.B. beim Omega-System, da trotz niedrigster Belastung der Messrohre, relativ große Schwingungsamplituden der Messrohrschleife erzielt werden können. Große Messamplituden ermöglichen einen großen Messeffekt und hohe Messwertstabilität bei externen Störungen. Bei Amplituden der Größenordnung des Innendurchmessers des Messrohres spielt die Kompressibilität von Gasen mit niedriger Dichte nahezu keine Rolle, da sämtliche Gasmoleküle durch die Bewegung des Rohres beschleunigt werden. Bei anderen Fabrikaten, wie Bild 4.04 zeigt, mit relativ kleinen Amplituden, z.B. bei der Geraden-Rohr-Symetrie wird der Messeffekt stark abhängig von der Gasdichte sein.

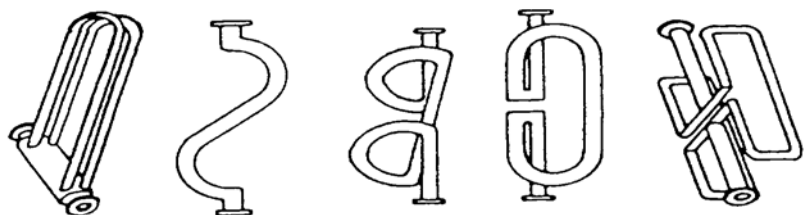


Bild 4.04 : Verschiedene Bauformen von Messwertaufnehmern /7

4.7 Druckverluste

Als Druckverlust versteht man im allgemeinen die Druckdifferenz, die zwischen der Ein – und Auslaufseite eines Messwertaufnehmers bei durchfließendem Produkt ansteht. In vielen Fällen geht man davon aus, dass beispielsweise gerade Messwertaufnehmerrohre praktisch keinen Druckverlust aufweisen. Bei den verwendeten Geräten handelt es sich um das Ein-Rohr-system (Promas I) und das Doppel-Rohr-System (Promas M) beides sind gerade Rohrsymmetrien. In Tabelle 4.01 sind die verwendeten Formeln aufgeführt.

In den folgenden Rechenbeispielen soll sowohl für den Promas I als auch für den Promas M bei einem beliebigen Massenstrom von z.B. 5000kg/h der Druckverlust Δp errechnet werden.

$$\Delta p_I = K * \nu^{0,25} * \dot{m}^{1,75} * \delta^{-0,75} + \frac{K_3 * \dot{m}}{\delta} \quad (4.01)$$

$$\Delta p_I = 7,8 * 10^4 * (1,004 * 10^6)^{0,25} * 1,3888^{1,75} * 1000^{-0,75} + \frac{0,11 * 10^4 * 1,3888^2}{1000} = 24,67 \text{ mbar}$$

mit:

Δp = Druckverlust [mbar]

δ = Messtoffdichte [kg/m³]

ν = Kinetische Viskosität [m²/s]

d = Innendurchmesser der Messrohre [m]

\dot{m} = Massendurchfluss in [kg/s]

K_1 - K_3 = Konstanten [nennweitenabhängig]

$$\Delta p_M = K * \nu^{0,25} * \dot{m}^{1,85} * \delta^{-0,86} \quad (4.02)$$

$$\Delta p_M = 1,7 * 10^6 * (1,004 * 10^6)^{0,25} * 1,388^{1,85} * 1000^{-0,86} = 259,59 \text{ mbar}$$

Wie man an diesen beiden Rechnungen sehen kann, ist der Druckverlust bei dem Promas M um den Faktor 10 höher als bei den Promas I, welches sich auf das Doppelrohrsystem und den damit verengten Rohrquerschnitt zurückführen lässt. Wie man schon am Beispiel des Doppelrohrsystems in Kapitel 4.5 sah, betrug die freie Querschnittsfläche dieses Sensors nur 31,8 % der tatsächlichen Fläche der Nennweite DN 25.

In den Diagrammen 4.01 und 4.02 sind die Druckverluste der verwendeten Geräte aufgeführt. Gerade Messrohranordnungen gelten als relativ steife (unflexible) Geometrien. Es sind in der Regel also hohe Fließgeschwindigkeiten notwendig, um einen bestimmten Messeffekt hervorzurufen. Hohe Fließgeschwindigkeiten bedeuten andererseits wieder erhöhten Druckverlust, da man diese hohen Fließgeschwindigkeiten nur durch Einsatz kleiner freier Rohrquerschnitte erzielen kann.

Es besteht auch die Gefahr der Kavitation⁶. Dadurch treten Störungen des Messsystems auf, die von einer geringen Verfälschung des Messwertes bis zum völligen Versagen des Systems führen können.

Diesem Problem kann in begrenztem Umfang begegnet werden, in dem man den Gegendruck (Auslaufseite des Meßwertaufnehmers) wo es möglich ist erhöht. Um den Druckverlust möglichst niedrig zu halten, sollte man vom Messbereich her passende Geräte auswählen, die möglichst große frei Rohrquerschnittsflächen aufweisen.

	Promass A / I	Promass M / F
Reynoldszahl	$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot d \cdot \nu \cdot \rho}$	$Re = \frac{2 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot d \cdot \nu \cdot \rho}$
$Re \geq 2300$ *	$\Delta p = K \cdot \nu^{0,25} \cdot \dot{m}^{1,75} \cdot \rho^{-0,75} + \frac{K3 \cdot \dot{m}^2}{\rho}$	$\Delta p = K \cdot \nu^{0,25} \cdot \dot{m}^{1,85} \cdot \rho^{-0,86}$
$Re < 2300$	$\Delta p = K1 \cdot \nu \cdot \dot{m} + \frac{K3 \cdot \dot{m}^2}{\rho}$	$\Delta p = K1 \cdot \nu \cdot \dot{m} + \frac{K2 \cdot \nu^{0,25} \cdot \dot{m}^2}{\rho}$
Δp = Druckverlust [mbar] ρ = Mediumsdichte [kg/m ³] ν = Kinematische Viskosität [m ² /s] d = Innendurchmesser der Meßrohre [m] \dot{m} = Massedurchfluß [kg/s] K...K3 = Konstanten (nennweitenabhängig)		
* Bei Gasen ist für die Berechnung des Druckverlustes grundsätzlich die Formel für $Re \geq 2300$ zu verwenden.		

Tabelle 4.01: Berechnungsformeln für den Druckverlust bei verschiedenen Gerätevarianten /8/

⁶ Unter Kavitation versteht man allg. die Bildung von Hohlräumen in einer Flüssigkeit unter der Einwirkung eines Unterdrucks

	Nennweite	d [m]	K (Flüssigk.)	K (Gas)	K1	K2	K3
Promass A	DN 1	$1,10 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{11}$	$2,0 \cdot 10^{11}$	$1,3 \cdot 10^{11}$	–	0
	DN 2	$1,80 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{10}$	$2,7 \cdot 10^{10}$	$2,4 \cdot 10^{10}$	–	0
	DN 4	$3,50 \cdot 10^{-3}$	$9,4 \cdot 10^8$	$16,0 \cdot 10^8$	$2,3 \cdot 10^9$	–	0
Promass A Hochdruck	DN 2	$1,40 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{10}$	$9,2 \cdot 10^{10}$	$6,6 \cdot 10^{10}$	–	0
	DN 4	$3,00 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^9$	$3,4 \cdot 10^9$	$4,3 \cdot 10^9$	–	0
Promass I	DN 8	$8,55 \cdot 10^{-3}$	$8,1 \cdot 10^6$	$13,8 \cdot 10^6$	$3,9 \cdot 10^7$	–	$129,95 \cdot 10^4$
	DN 15	$11,38 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^6$	$3,9 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^7$	–	$23,33 \cdot 10^4$
	DN 15 *	$17,07 \cdot 10^{-3}$	$4,1 \cdot 10^5$	$7,0 \cdot 10^5$	$3,3 \cdot 10^6$	–	$0,01 \cdot 10^4$
	DN 25	$17,07 \cdot 10^{-3}$	$4,1 \cdot 10^5$	$7,0 \cdot 10^5$	$3,3 \cdot 10^6$	–	$5,89 \cdot 10^4$
	DN 25 *	$25,60 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^4$	$13,3 \cdot 10^4$	$8,5 \cdot 10^5$	–	$0,11 \cdot 10^4$
	DN 40	$25,60 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^4$	$13,3 \cdot 10^4$	$8,5 \cdot 10^5$	–	$1,19 \cdot 10^4$
	DN 40 *	$35,62 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^4$	$2,2 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^5$	–	$0,08 \cdot 10^4$
	DN 50	$35,62 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^4$	$2,2 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^5$	–	$0,25 \cdot 10^4$
Promass M	DN 8	$5,53 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^7$	$8,8 \cdot 10^7$	$8,6 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^7$	–
	DN 15	$8,55 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^6$	$9,0 \cdot 10^6$	$1,7 \cdot 10^7$	$9,7 \cdot 10^5$	–
	DN 25	$11,38 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^6$	$2,9 \cdot 10^6$	$5,8 \cdot 10^6$	$4,1 \cdot 10^5$	–
	DN 40	$17,07 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^5$	$5,4 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^5$	–
	DN 50	$25,60 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^4$	$10,9 \cdot 10^4$	$4,5 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^4$	–
	DN 80	$38,46 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^4$	$2,4 \cdot 10^4$	$8,2 \cdot 10^4$	$3,7 \cdot 10^3$	–
Promass M Hochdruck	DN 8	$4,93 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^7$	$10,2 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^8$	$2,8 \cdot 10^7$	–
	DN 15	$7,75 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^6$	$13,6 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^6$	–
	DN 25	$10,20 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^6$	$4,6 \cdot 10^6$	$8,9 \cdot 10^6$	$6,3 \cdot 10^5$	–
Promass F	DN 8	$5,35 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^7$	$9,7 \cdot 10^7$	$9,6 \cdot 10^7$	$1,9 \cdot 10^7$	–
	DN 15	$8,30 \cdot 10^{-3}$	$5,8 \cdot 10^6$	$9,9 \cdot 10^6$	$1,9 \cdot 10^7$	$10,6 \cdot 10^5$	–
	DN 25	$12,00 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^6$	$6,4 \cdot 10^6$	$4,5 \cdot 10^5$	–
	DN 40	$17,60 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^5$	$6,0 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^5$	–
	DN 50	$26,00 \cdot 10^{-3}$	$7,0 \cdot 10^4$	$11,9 \cdot 10^4$	$5,0 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^4$	–
	DN 80	$40,50 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^4$	$2,4 \cdot 10^4$	$8,2 \cdot 10^4$	$3,7 \cdot 10^3$	–

Tabelle 4.02: Konstanten zur Druckverlustberechnung /8/

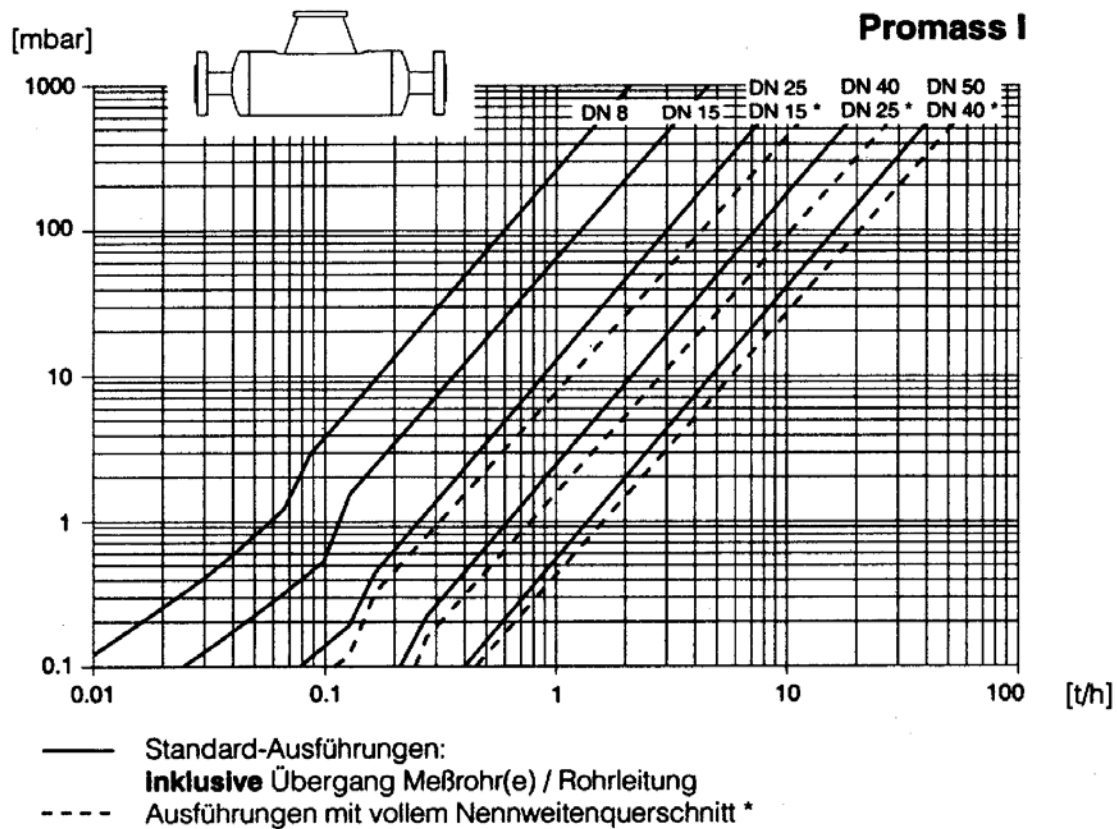


Diagramm 4.01: Druckverlustangaben des zur Messung der Zwei-Phasen-Strömung eingesetzten Coriolis-Massensessers Promass I, DN 25* /8/

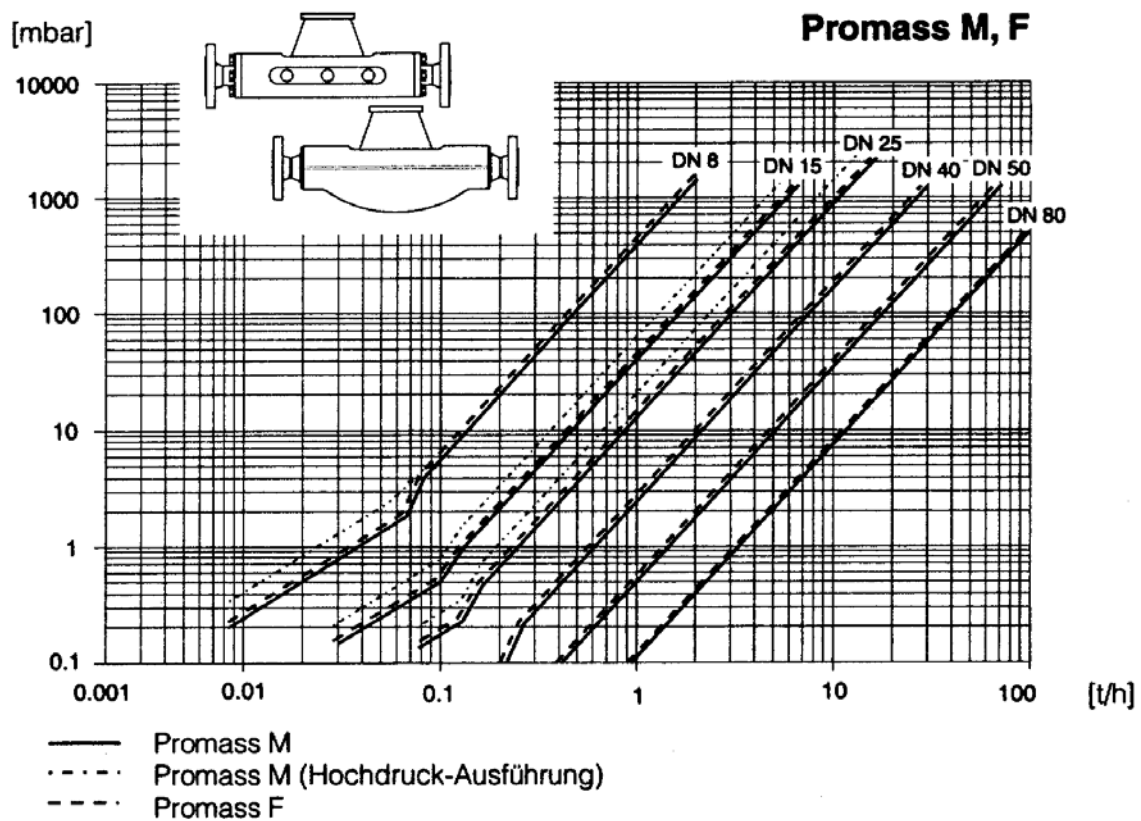


Diagramm 4.02: Druckverlustangaben des Referenzgerätes zur Messung der Zwei-Phasen-Strömung Promass M, DN25 /8/

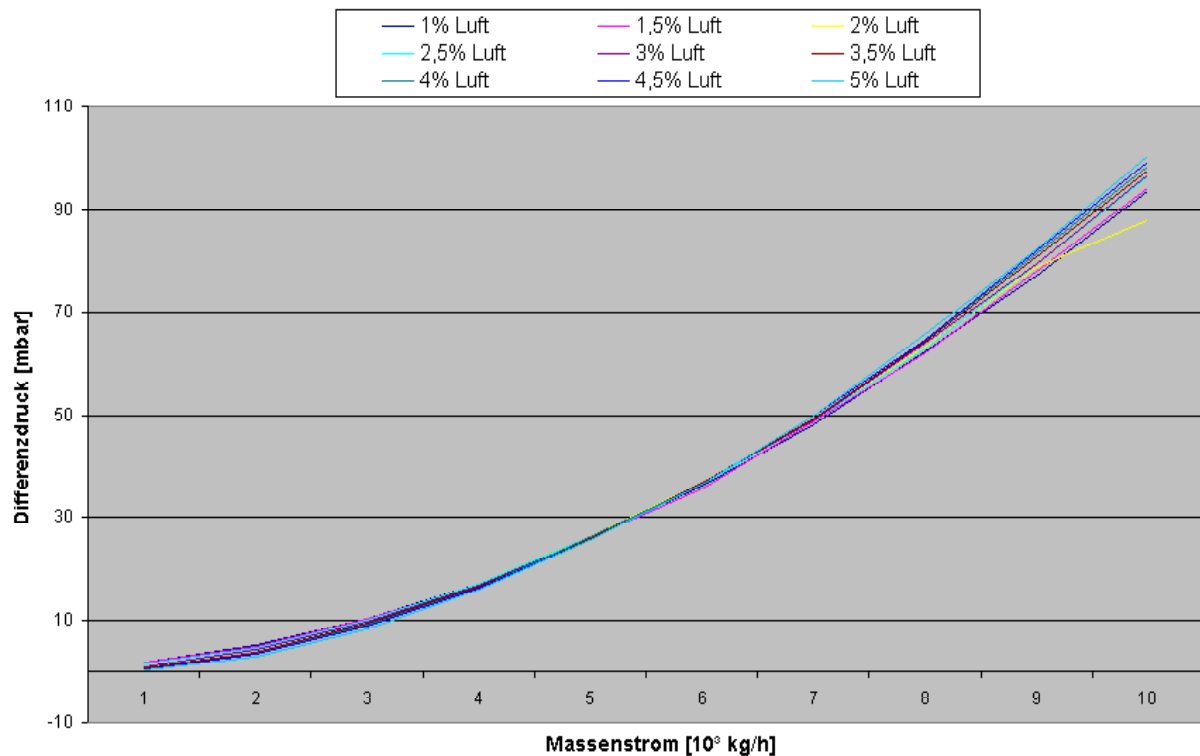


Bild 4.05: Die aufgenommenen Differenzdrücke der Versuchsanlage

4.8 Gaseinschlüsse in der Flüssigkeit

Grundsätzlich erzeugt jedes Strömungshindernis einen Druckverlust. Dies ist auf eine einfache Rohrwand übertragbar. Der Druckverlust in Rohrleitungen oder Messsystemen sorgt nun dafür, dass die Gasblasen wachsen können.

Warum das so ist, liegt nicht in erster Linie an dem Druckverlust, sondern an einer der Gaseigenschaften, die Gas grundsätzlich von Flüssigkeiten unterscheidet, nämlich dass Gas kompressibel ist.

Das bedeutet, dass sich das Volumen einer Gasblase bei zunehmendem Druck verkleinert bzw. bei abnehmendem Druck vergrößert. Der Druckverlust über einem Rohr sorgt nun ebenfalls dafür, dass im Medium enthaltene Gasblasen ihr Volumen vergrößern. Dieser Effekt führt dazu, dass im hinteren Messrohrteil ein größeres Gasvolumen als im vorderen Teil ist.

Eine zusätzliche Inhomogenität ist der Fall. Selbstverständlich ist dadurch auch weniger flüssiges Medium im hinteren Messrohrteil.

5 Physikalische Grenzen von Massendurchflussmessgeräten

5.1 Messfehler / Messunsicherheiten

Die meisten Anbieter spezifizieren die Genauigkeiten der Massendurchflussmesser unter Angabe der Genauigkeit in % bezogen auf den momentanen Durchflusswert, zuzüglich der sogenannten Nullpunktstabilität, die in absoluten Masse-Durchflusseinheiten (kg/min. gr/sec.) angegeben wird.

Die Nullpunktstabilität variiert von Gerätetyp zu Gerätetyp. Aus diesen beiden Angaben läßt sich die zu erwartende Genauigkeit nach folgender Formel berechnen:

$$U_c = \pm \frac{\frac{m_n}{100} \times e_s + N}{q_m} \times 100(\%) \quad (5.01)$$

U_c = Meßunsicherheit in %

q_m = Massendurchfluß

e_s = spezifizierte Genauigkeit (%)

N = Nullpunktstabilität (kg/min.)

Es ist darauf zu achten, daß man für „ q_m “ und „ N “ immer die gleichen Dimensionseinheiten einsetzt !

Beispiel:

Durchflussmesser: Typ ABC, **min. Messbereich:** 0-50 gr/min., **max. Messbereich:** 0-100 gr/min.

Genauigkeit: +/- 0,2 %, Nullpunktstabilität: +/- 0,09 gr/min.

Gesucht ist die Messabweichung bei einem Durchsatz von 27 gr/min.

$$U_c = \pm \frac{\frac{27}{100} * 0,2 + 0,09}{27} * 100 = \pm 0,533\%$$

Bei einem Durchsatz von 27 gr/min. beträgt der zu erwartende Fehler $\pm 0,533\%$ von 27 g/min. oder $\pm 0,144$ g/min.

5.2 Messgenauigkeit bei verschiedenen Bauformen und Einbauorten

In eingebautem Zustand, unter den in der Industrie üblichen Umgebungsbedingungen, wie z.B. Vibrationen oder Rohrleitungsverspannungen, weicht die Genauigkeit von Coriolis-Massendurchflussmessgeräten prinzipiell von der unter Idealbedingungen auf dem Prüfstand ermittelten Genauigkeit ab. Außerdem können sich bei unterschiedlichen Applikationen durchaus abweichende Fehlergrenzen ergeben, was sich auf die unterschiedlichen Rohrsymmetrien, wie z.B. Ein- bzw. -Zweirohrsystem zurückführen läßt. So darf man annehmen, dass auch bereits geringe Inhomogenitäten des Mediums (z.B. Gaseinschlüsse) Einfluss auf die Genauigkeit ausüben werden.

Meßabweichungen⁷: Massendurchfluß (Flüssigkeit)

Promass M	$\pm 0,1\%v.M.$	$\pm 0,005\%v.E.$
Promass I	$\pm 0,2\%v.M.$	$\pm 0,01\%v.E.$

Massendurchfluß (Gas)

Promass M	$\pm 0,5\%v.M.$	$\pm 0,005\%v.E.$
Promass I	$\pm 0,5\%v.M.$	$\pm 0,01\%v.E.$

Volumendurchfluß (Flüssigkeit)

Promass M	$\pm 0,25\%v.M.$	$\pm 0,005\%v.E.$
Promass I	$\pm 0,5\%v.M.$	$\pm 0,01\%v.E.$

v.M. = vom momentanen Meßwert

v.E. = vom maximalen Endwert

Wie man an Hand dieser Messabweichung sieht, hat die Massemessung strömender Medien mit dem Einsatz eines Coriolis-Massemessers eine bisher nie gekonnte Genauigkeit erreicht. Diese kann ausschließlich durch Wägung übertroffen werden.

⁷ Produktunterlagen der Firma Endress & Hauser Meßtechnik GmbH & CO.

6 Transmitter

Die Transmitter (Bonfig, 1991) haben die Aufgabe, den Messwertaufnehmer zu speisen, d.h. über die im Messwertaufnehmer vorhandene, in der Regel elektromagnetische Erregereinheit das oder die Meßrohre in Schwingung zu halten. Desweiteren werden die einzelnen Messsignale vom Aufnehmer verarbeitet und in die entsprechenden Ausgangssignale proportional zum Massendurchfluss umgewandelt.

Alle Geräte, die erhältlich sind, liefern natürlich als Basisfunktion die Massendurchflussmessung mit einem entsprechendem analogen Ausgangssignal. Da das Coriolis-Messprinzip auch die Messung der Dichte zuläßt, steht diese Messgröße u. U. auch als Ausgangssignal zur Verfügung. Die Temperatur wird bei allen Messwertaufnehmern zu Kompensationszwecken ebenfalls gemessen und steht teilweise als Ausgangssignal zur Verfügung. Je nach Hersteller bieten die Transmitter weitere Funktionen, die von Berechnungsmöglichkeiten verschiedener Parameter, wie Volumendurchfluß, oder %- Feststoffkonzentration, errechnet aus den vorhandenen Meßsignalen für Massendurchfluß, Dichte und Temperatur, bis zu Spezialfunktionen reichen. Darunter sind unter anderem hilfreiche Funktionen, wie z.B. Chargendosierung oder PID-Regelung.

Die Verkabelung zwischen Messwertaufnehmer und Transmitter erfordert mehr oder weniger komplizierte Sonderkabel in mehradriger Ausführung. Verschiedene Anbieter bieten eine sogenannte 2-Leiter-Ausführung an. Dabei wird die Signalübertragung zum Transmitter in digitaler Form über eine zweiadrige Verbindung durchgeführt. Der Nachteil dabei ist, dass die eigentliche Signalverarbeitung / Aufbereitung vor Ort, also direkt am Messaufnehmer, durchgeführt wird. Die dazu notwendige Halbleiter-Elektronik ist also den unter Umständen widrigeren Betriebsverhältnissen der Umgebung ausgesetzt. Es kommt dadurch auch zu stärkeren Einschränkungen in den zulässigen Betriebstemperaturen. Die Bedienbarkeit der Transmitter ist unterschiedlich. Einige Ausführungen sind „blind“, d.h. ohne Bedientastatur und Anzeige. Die Bedienung, d.h. Änderung von Parametern, kann nur mittels eines Handterminels oder über einen Computer durchgeführt werden. Andere Geräte verfügen über eine Reihe analoger und digitaler Einstellmöglichkeiten. Die wohl elegantesten Ausführungen sind mit einer teilweisen mehrzeiligen alphanumerischen Digitalanzeige ausgeführt und können über eine integrierte zwei- oder dreitastige Tastatur programmiert werden.

7 Signalerzeugung und Signalerfassung

7.1 Sensorspannung in der Zeitdarstellung

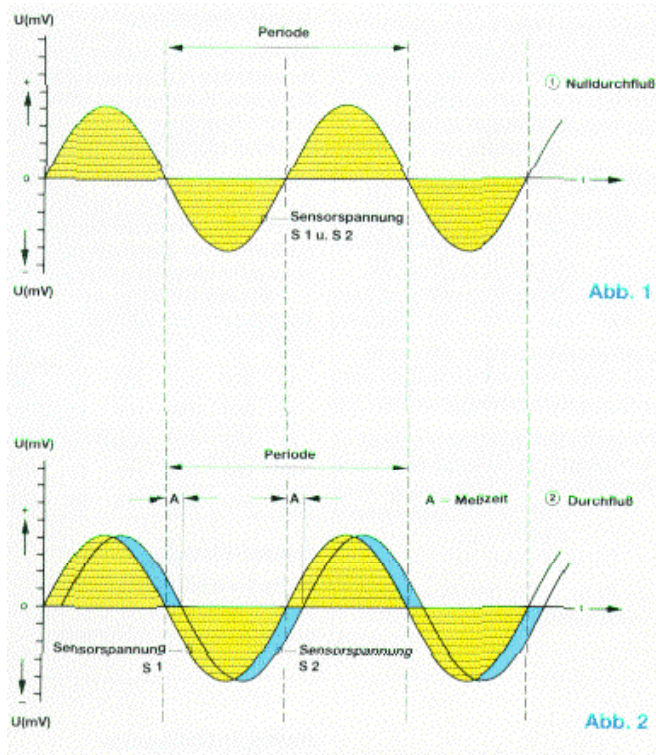


Bild 7.01: Zeigt in Abb.2 die Phasenverschiebung bei durchflossenem Rohr /8/

Am symmetrisch angeordneten induktiven Abgriff steht ein sinusförmiges Signal entsprechend der Winkelgeschwindigkeit der zwei Messschleifen zueinander an. Die Zeitdifferenz „A“, mit der die zwei Rohrschleifen die Nullage passieren, wird im Messumformer zu einem Standard-Messsignal (mA, Frequenz) umgeformt.

Die Abb.1 in Bild 7.01 zeigt den zeitlichen Verlauf und die Deckungsgleichheit der Sensorspannung S_1 zu S_2 bei Nulldurchfluss. Da es sich um eine Resonanzschwingung handelt, ist der Verlauf sinusförmig.

Die Abb.2 in Bild 7.01 zeigt die zeitliche Verschiebung „A“ der Nulldurchgänge der sinusförmigen Sensorspannung S_1 zu S_2 bei Durchfluss. Die beiden resultierenden Messspannungen unterscheiden sich charakteristisch von der Darstellung bei Nulldurchfluss.

8 Aufbau des Versuchsstandes

8.1 Anforderungen

Da bei Druckabfall in einem System die Möglichkeit besteht, dass gelöste Gasbestandteile wieder in Lösung gehen können, mußte die Möglichkeit der Lufterindüsung, um dieses Verhalten in verschiedenen Betriebszuständen simulieren zu können, vorhanden sein. Unter letzterem versteht man, z.B. verschiedene Druckstufen (0-4 bar), Massenströme (1000kg/h-17000kg/h) und Luftvolumenströme (1-5Vol.% vom Massenstrom). Desweiteren mußte eine Möglichkeit geschaffen werden, dass die eingedüste Luft noch vor Erreichen des Referenzmessgerätes das System wieder verlassen kann. Dies wurde mit einem Gas / Wasserabscheider realisiert (Abmaße können den Zeichnungen im Anhang entnommen werden).

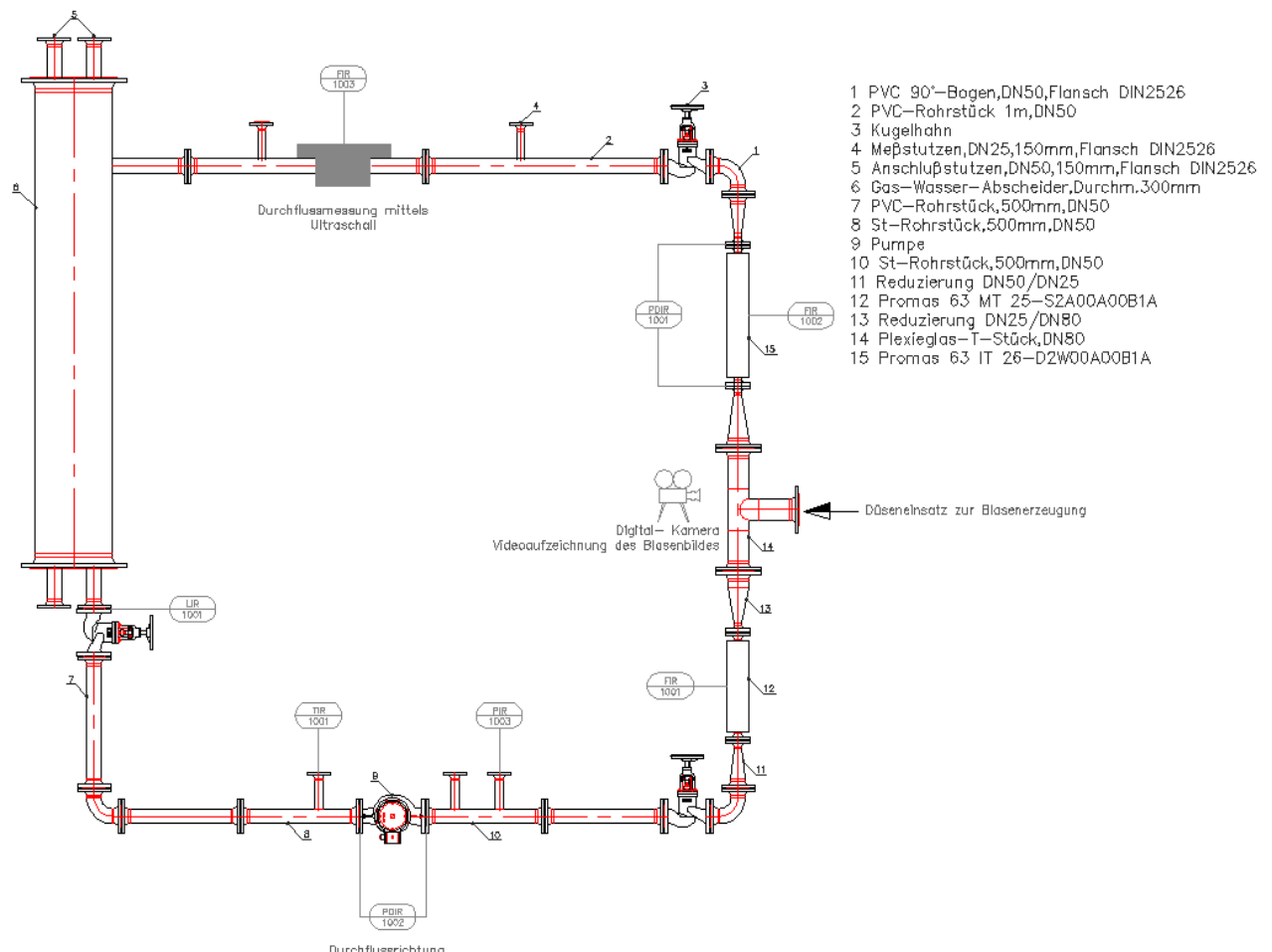


Bild 8.01 : Darstellung des Wasserkreislaufs (Loop)

8.2 Bauteile des Loops

8.2.1 Trockenläuferpumpe

Die Überlegungen hinsichtlich der Pumpe gingen dahin, dass die Pumpe so dimensioniert werden mußte, dass auch die nachfolgenden Diplomarbeiten, welche sich unter Umständen mit hochviskosen Medien wie z.B. einer Zuckerlösung beschäftigen könnten, eine Pumpe zur Verfügung haben, die auch noch eine genügend große Leistungsreserve beinhaltet.

Technische Daten der Pumpe:

Fabrikat: Grundfos TP 50-180

Förderstrom: bis 25 m³/h

Förderhöhe: bis 10,5m

Mediumtemperatur: -15°C bis +140°C

Max. Betriebsdruck: 10bar



Bild 8.02: Grundfospumpe /9/

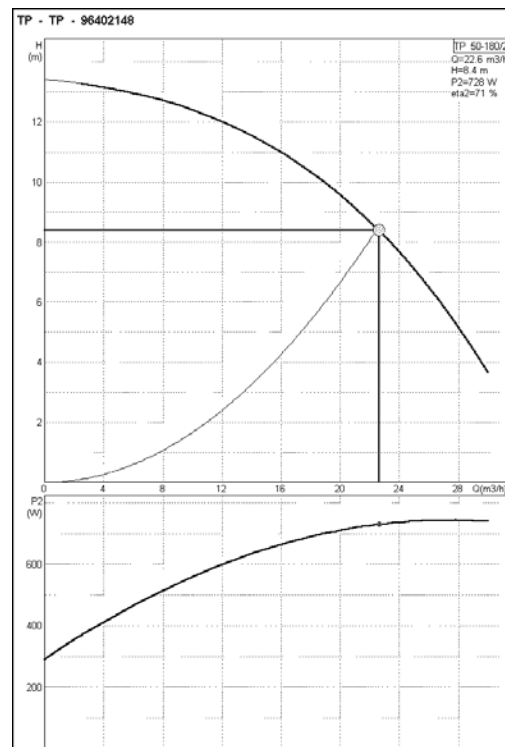


Diagramm 8.01: Zeigt das Pumpenkennfeld /9/

8.2.2 Differenzdruckmesser

Die Überlegungen zum Einsatz eines zusätzlichen Differenzdruckmessers waren folgende da, wie schon in Kapitel 4.8 erwähnt, der Druckabfall über dem Messgerät auch die Blasengeometrie im Messgerät ändert, und zwar dahingehend, daß das Luftvolumen im oberen Messrohrteil größer wird, sollte mit Hilfe des Differenzdruckes eine mögliche Aussage über die Zusammenhänge zwischen Luftvolumenstrom und Differenzdruck getroffen werden können.

8.2.2.1 Aufbau und Funktionsweise

Der Differenzdrucktransmitter hat ein flüssigkeitsgefülltes Membranmesssystem, dessen druckproportionale Auslenkung mittels induktivem Wegumformer in ein elektrisches Einheitssignal umgesetzt wird. Die zu vergleichenden Drücke wirken jeweils auf eine Trennmembran und werden durch die Übertragungsflüssigkeit an die Messmembran weitergeleitet. Bei Druckgleichheit befindet sich das Messsystem in Ruhelage. Besteht eine Druckdifferenz zwischen dem (+)- und dem (-)- Anschluß, so lenkt die entstehende Kraft die Messmembran in Richtung des niedrigeren Druckes aus. Der Auslenkungsweg ist druckproportional. Die Umsetzung der Wegauslenkung in ein elektrisches Signal geschieht mittels induktivem Hubgeber mit nachgeschalteter Elektronik. Die technischen Daten können den Unterlagen am Versuchsstand entnommen werden.

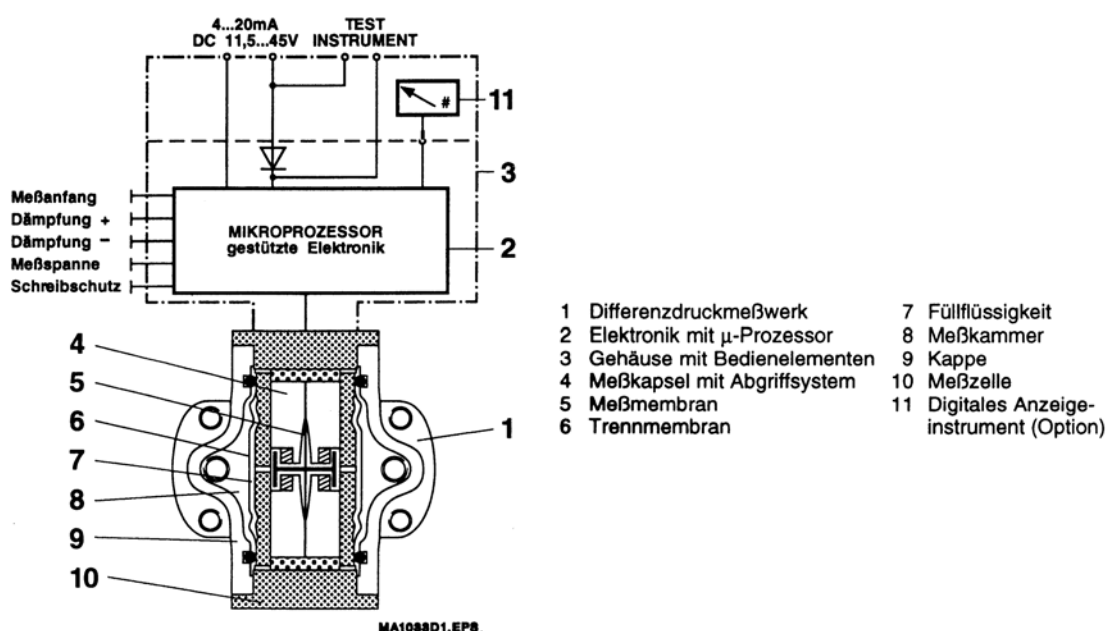


Bild 8.03: Funktionsschema eines Differenzdrucktransmitters /10/

8.2.3 Coriolis-Massedurchflussmessgerät

Die unteren Bilder zeigen die in der Versuchsanlage eingebauten Coriolismassemesser. Wie in Bild 8.04 zu sehen ist, steht uns der Promas 63 MT 25 als Referenzgerät zur Verfügung, wobei der Promas 63 IT 26 Bild 8.05 zur Messung der Zwei-Phasen-Strömung vorgesehen ist.



Bild 8.04: Darstellung des Promas 63 MT 25 als Referenzgerät in der Versuchsanlage



Bild8.05: Darstellung des Promas 63 IT 26 in der Versuchsanlage

8.2.4 Widerstandsthermometer / PT100

In der Versuchsanlage wurde zur unabhängigen Temperaturmessung ein separat eingebautes elektrisches Thermometer Typ TP 100 benutzt.

8.2.4.1 Funktionsweise

Je nach Ausführung sind Widerstandsthermometer zwischen -200°C und $+850^{\circ}\text{C}$ einsetzbar, wobei die Messwiderstände und damit die Schutzrohre den Temperaturen direkt ausgesetzt sind. Widerstandsthermometer bestehen fast immer aus Schutzrohr, Anschlusskopf und Messeinsatz. In dem Messeinsatz, der in das Schutzrohr eingebracht ist, befinden sich ein oder zwei Messwiderstände. Der Kopf enthält meistens den Anschlussblock mit den Klemmen zum Anschluss der weiterführenden Leitungen.

Beim Widerstandsthermometer ändert sich der elektrische Widerstand in Abhängigkeit mit der Temperatur. Um das Ausgangssignal zu erfassen, wird der Widerstand mit einem konstanten Messstrom gespeist und der hervorgerufene Spannungsabfall gemessen. Der Messumformer setzt die am Messwiderstand abfallende Spannung in ein temperaturlineares 4-20mA Signal um. Eine Erwärmung des Sensors durch den Messstrom ist zu vermeiden, daher sollte der Messstrom möglichst klein gehalten werden.

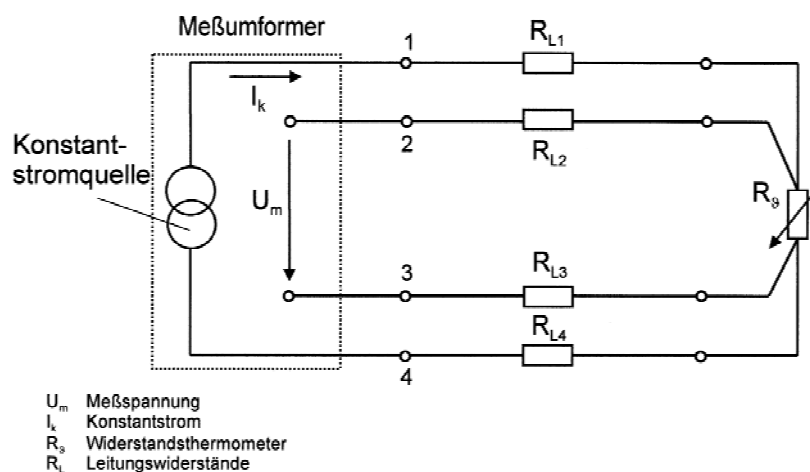


Bild 8.06: Zeigt die Temperaturmessung mit Widerstandsthermometer und konstanter Stromquelle in einer 4-Leiterschaltung /11/

Zur Übertragung des Messsignals werden drei Anschlussschaltungen unterschieden, Bild 8.06 zeigt die von uns verwendete 4-Leiterschaltung. Bei der 4-Leiterschaltung wird das Mess-

gebnis weder von Leitungswiderständen noch von deren temperaturabhängigen Schwankungen beeinflusst. Es muss beachtet werden, daß bei der 4-Leiteschaltung diese nicht immer bis zum Messwiderstand geführt ist.

8.3 Druckluftseite der Versuchsanlage

8.3.1 Schwebekörper-Durchflussmesser

Zur Messung des Luftvolumenanteils am Massenstrom wurden von uns Schwebekörperdurchflussmessgeräte eingesetzt. Die Geräte der Firma Turbo besitzen eine Genauigkeit von 1%.

8.3.1.1 Messprinzip

Der Schwebekörper-Durchflussmesser von der Firma Turbo ist ein Gerät zur Messung des Durchflusses von Flüssigkeiten und Gasen in Rohrleitungen. Wie das Bild 8.07 zeigt enthält er ein vertikales, sich nach oben erweiterndes und von unten nach oben von dem Messstoff durchströmtes Rohr, in welchem sich ein vertikaler beweglicher Schwebekörper befindet.

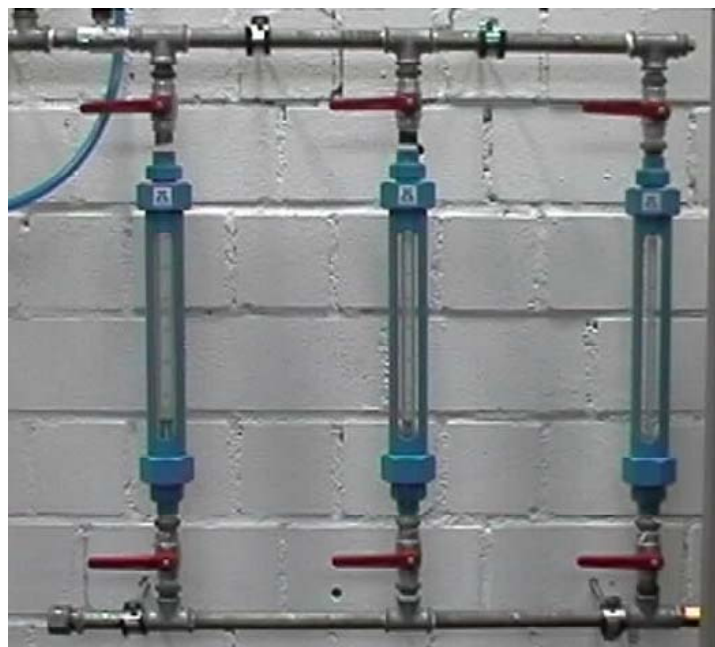
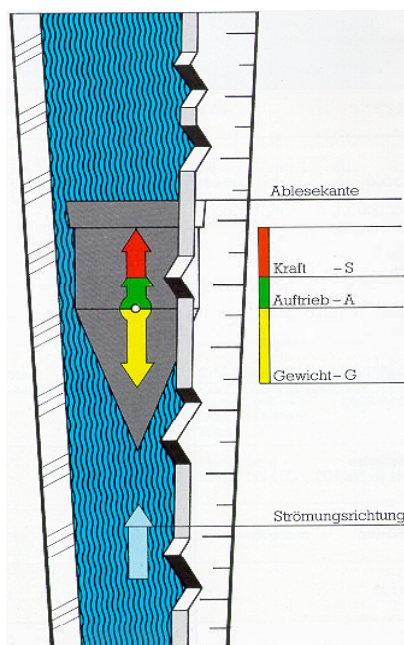


Bild 8.07: Prinzip des Schwebekörper-Durchflussmesser /10/

Bild 8.08: Einbausituation in der Versuchsanlage

Der Messstoff strömt von unten nach oben durch das Rohr. Dabei hebt er den Schwebekörper soweit an, bis ein Ringspalt zwischen Rohrwand und Schwebekörper entsteht, so dass die auf den Körper wirkenden Kräfte im Gleichgewicht sind. Jeder Höhenlage des Schwebekörpers entspricht so ein bestimmter Durchfluss, der dann auf einer Skala abgelesen werden kann. Auf den Schwebekörper wirken im wesentlichen drei Kräfte, die konstante Erdanziehung, die hydraulische Auftriebskraft „A“, die gemäß dem Archimedisches Prinzip bei konstanter Dichte des Messstoffs ebenfalls konstant ist und die Kraft „S“, mit der die Strömung den Schwebekörper anhebt.

Da bei einer vorgegebenen Messgeräte-Applikation „G“ und „A“ konstant sind, muss im Schwebezustand die Kraft „S“ ebenfalls konstant sein und die Summe der Kräfte „S“ und „A“ entgegengesetzt gleich groß sein. Dies wird durch den geänderten Ringspalt bei der jeweiligen stabilen Position des Schwebekörpers in dem konischen Messrohr erreicht. Jedem Durchflusswert entspricht somit ein definierter Ringspalt, der bei bekannter Kapazität des Messrohrs einer bestimmten Höhe des Schwebekörpers entspricht. Die übliche Form für das Messrohr ist der Konus. Bei Glaskonen kann der Durchflusswert in Höhe der Ablesekante des Schwebekörpers an einer Skala direkt abgelesen werden.

8.3.1.2 Prüfung der Genauigkeit durch das Auslitterverfahren

Es stellte sich das Problem, dass möglicherweise die Druckverhältnisse in den Schwebekörperdurchflussmessgeräten mit denen am Austritt der Eindüsvorrichtung in der Versuchsanlage nicht übereinstimmten.

Als erstes wurde der Loop mit Wasser gefüllt und der obere Kugelhahn geschlossen. An dem Schwebekörperdurchflussmessgerät wurde nun das einzudüsende Luftvolumen von beispielsweise 60 l/h eingestellt und der Absperrhahn zwischen Anlage und Schwebekörperdurchflussmessgerät geöffnet. Man kann nun beobachten, daß sich der Wasserspiegel von oben nach unten bewegt. Bei Erreichen der „0“ Markierung (Bild 8.09) wurde die Zeitnahme aktiviert und bei Durchlaufen der „20“ Markierung wieder gestoppt. Durch vorheriges berechnen des Auszulitterten Volumens (1 Liter) und der gemessenen Zeit konnte die gewählte Einstellung kontrolliert werden. Bei richtiger Einstellung mußte der Wasserspiegel die beiden Markierungen in einer Minute durchlaufen.

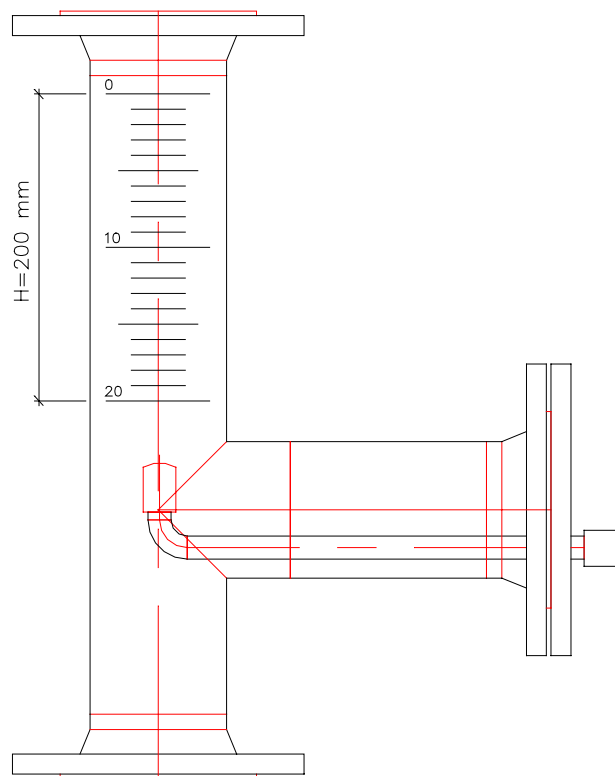


Bild 8.09: T-Stück mit Markierung zum Auslittern

d = Innendurchmesser des Rohres [m]

V = Auszulitterndes Volumen [m^3]

H = Höhe des Auszulitternden Volumens [m]

q_v = Volumenstrom [m^3/h]

$$q_v = \left(\frac{d^2 * \pi}{4} * h \right) / t \quad (8.01)$$

8.4 Schaltschrank

Diese Baugruppe der Anlage setzt sich zusammen aus einem Messumformerspeisegerät des Typs AHMS 271 der Firma Apparatebau Hundsbach GmbH, einem Frequenzumrichter des Typs DF 4-120 für Drehstromantriebe von 0,37-2,2 kW der Firma Klöckner/Moeller und einem Signalerfassungsgerät der Firma Fluke von Typ NET DAQ 2640A/2645A. Weitere technische Daten können den am Versuchsstand befindlichen Bauteilunterlagen entnommen werden.

9 Versuchsdurchführung

9.1 Vorbereitungen

9.1.1 Arbeitsschritte beim Befüllen des Loops

1. Es muß sichergestellt sein, dass alle Flanschverbindungen fest verschraubt und mit Dichtungen versehen sind, desweiteren müssen alle Absperrventile geöffnet sein.
2. Zum Befüllen des Loops wird der schwarze Kugelhahn des roten Gummischlauches, der sich an dem Rohrstück rechts neben der Pumpe befindet, geöffnet.
3. Jetzt kann man den roten Kugelhahn des roten Schlauches langsam öffnen und den Loop bis zur Markierung füllen. Bei Undichtigkeiten ist der Vorgang sofort abubrechen, die undichte Stelle mit einer neuen Dichtung zuversehen und bei Punkt 2 fortzufahren.
4. Der Differenzdrucktransmitter (grauer Block oberhalb der Eindüsvorrichtung) wird in Betrieb genommen, indem man alle drei Stellsitze am dem Drei-Wege-Ventil öffnet, die beiden Kugelhähne an den unteren Ausläufen öffnet und wartet bis Wasser austritt, dann wieder schließt und zum Schluss den mittleren Stellsitz des Drei-Wege-Ventil verschließt. Jetzt stellt sich ein Differenzdruck ein.
5. Der Hauptabsperrrhahn für die Druckluft auf der linken Seite am Eingang des Heizungslabors öffnen.
6. Die Druckluftseite mit dem blauen Schlauch an der Eindüsvorrichtung anschließen und den Anlagenabsperrrhahn öffnen.
7. Der Vordruck, der von der Hausdruckluftseite ansteht, ist dem Gegendruck der Anlage anzupassen. Diese Einstellung sollte über das Auslittern kontrolliert werden.
8. Messgeräte über die Herausnahme des FI-Schutzschalters (der sich auf der linken Seite im Schaltschrank befindet) mit Strom versorgen.

9.1.2 Vorbereitungen zur Datenaufnahme

1. Computer des Typs Pioneer 486er, 66MHz und 8 MB RAM einschalten.
2. Programm „Fluke NET DAQ“ starten.
3. Einstellungen ↵
4. öffnen Einstellungen ↵

5. Über das Verzeichnis c:\ mit einem Doppelklick das Verzeichnis „user“ auswählen, dann das Unterverzeichnis vantreek mit einem Doppelklick wählen und Einstellung Coriolis.stp mit einem „O.K.“ bestätigen. Dadurch sind die gerätespezifischen Einstellungen für diese Anlage geladen.
6. Über Einstellungen ↵, Gerätekonfiguration ↵, gelangt man zu den einzelnen Kanälen und Datendateien für z.B. Druck, Temperatur und Massenstrom in denen man die einzelnen Funktionen wie z.B. Nullpunktabgleich oder den Versatz vornehmen kann. Desweiteren können dort auch Dateipfade angelegt werden. (alle Eingaben werden mit „O.K.“ bestätigt).
7. Es gibt zwei Möglichkeiten die Messung zu starten, zum einen über Drücken des Startbutton und zum anderen über die Menueleiste mit Plot/Trend und zeige Schnell-Plot.
8. Eine andere Anzeigevariante ist die Möglichkeit, sich über Trend-link sich die Messdaten anzeigen zu lassen, dazu müssen aber einige Grundeinstellungen vorgenommen werden, wie z.B. die Toleranzbereiche der Kurven. Auf diese Möglichkeit möchte ich hier aber nicht weiter eingehen.
9. Mit Datei ↵, Beenden ↵ kann das Programm beendet werden.
10. Bei der Abfrage „Einstellungen speichern“, sollte man immer mit „ja“ bestätigen.
11. Mit Datei ↵ und der Bejaung Windows beenden springt der PC in den MS-DOS Modus zurück.
12. Jetzt kann der PC ausgeschaltet werden.

9.1.3 Ablauf einer Messung

1. An den Volumenstrommessgeräten den einzudüsenden Luftvolumenstrom einstellen.
2. Über den Frequenzumrichter die Drehzahl der Pumpe und somit den gewollten Massenstrom einstellen.
3. Nochmalige Kontrolle dieser Werte.
4. Die Daten der Messgeräte (Temperatur, Differenzdruck, Dichte 1, Dichte 2, Massenstrom 1 und Massenstrom 2) werden mit einer Abtastrate von einer Sekunde vom Datenerfassungsgerät der Firma Fluke erfaßt und fast zeitgleich über ein Datenkabel dem Computer zur weiteren Verarbeitung übermittelt.
5. Über das schon erwähnte Computerprogramm wird jetzt die Aufzeichnung gestartet.

10 Messwertaufnahme

Zur Ermittlung der Messungenauigkeiten der Coriolismassedurchflussmessgeräte die uns die Firma Endress & Hauser zur Verfügung gestellt hat, wurden zwei Hauptmessreihen mit zum einen 70 Meßzyklen in der ersten Messreihe und zum andern 90 Messzyklen in der zweiten Messreihe durchgeführt. Die Dauer der einzelnen Messzyklen betrug 5 Minuten.

In dieser Zeit wurde ein ganz bestimmter Strömungszustand erzeugt, wie z.B. einen Massendurchfluss von 1000kg/h und einer Lufteindüsung von beispielsweise 1Vol.% bezogen auf den Massendurchfluss. In der ersten Messreihe wurden die Massendurchflüsse von 1000-10000 kg/h und den jeweiligen Luftvolumenanteilen von 2-20Vol.% eingestellt, die entstandenen Messabweichungen der jeweiligen Strömungszustände aufgezeichnet und zur weiteren Verarbeitung gespeichert. In Bild 10.01 ist die Eindüsvorrichtung mit dem verwendeten Perlatoraufsatz der ersten Messreihe abgebildet.

Nach Beurteilung der ersten Messreihe zeigte sich bereits, dass ein Luftvolumenanteil über 5Vol.% ein Versagen des Messgerätes zur Folge hat. Daraus folgend wurden in der zweiten Messreihe Luftvolumenanteile von 1- 5Vol.% mit einer Abstufung von 0,5Vol.% eingestellt, deren Messabweichungen aufgezeichnet und zur weiteren Beurteilung gespeichert. Desweiteren wurde ein Düsenaufsatz aus Sintermaterial, wie ihn Bild 10.02 zeigt, zur Erzeugung feinerer Luftblasen verwendet. Diese Blasenbilder sind zur Verdeutlichung auf der folgenden Seite in Bild 10.03 bei verschiedenen Volumenströmen (10; 30; 80; 200 l/h) dargestellt.



Bild 10.01: Eindüsung mit Perlatoraufsatz

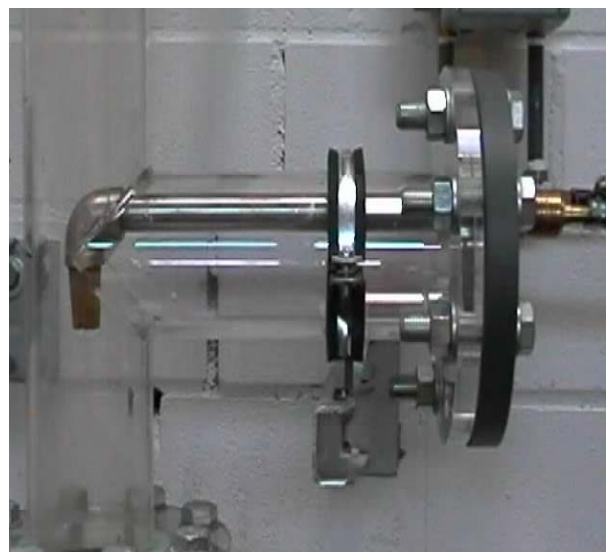


Bild 10.02: Eindüsung mit Sintermetall

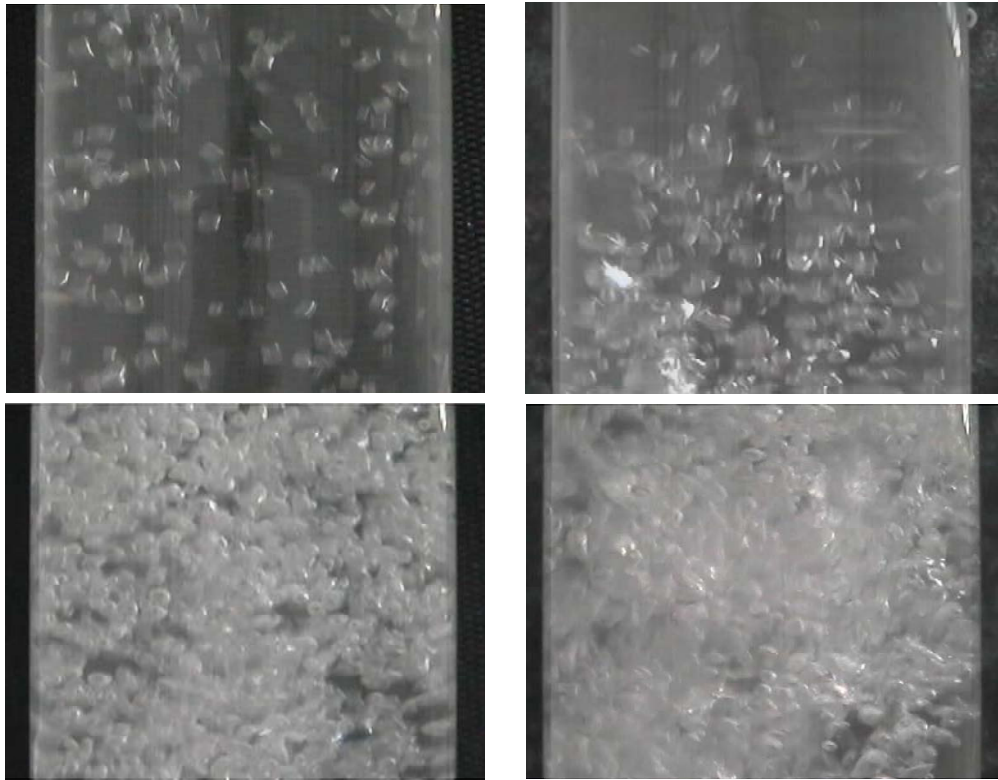


Bild 10.03: Zeigt verschiedene Blasenbilder

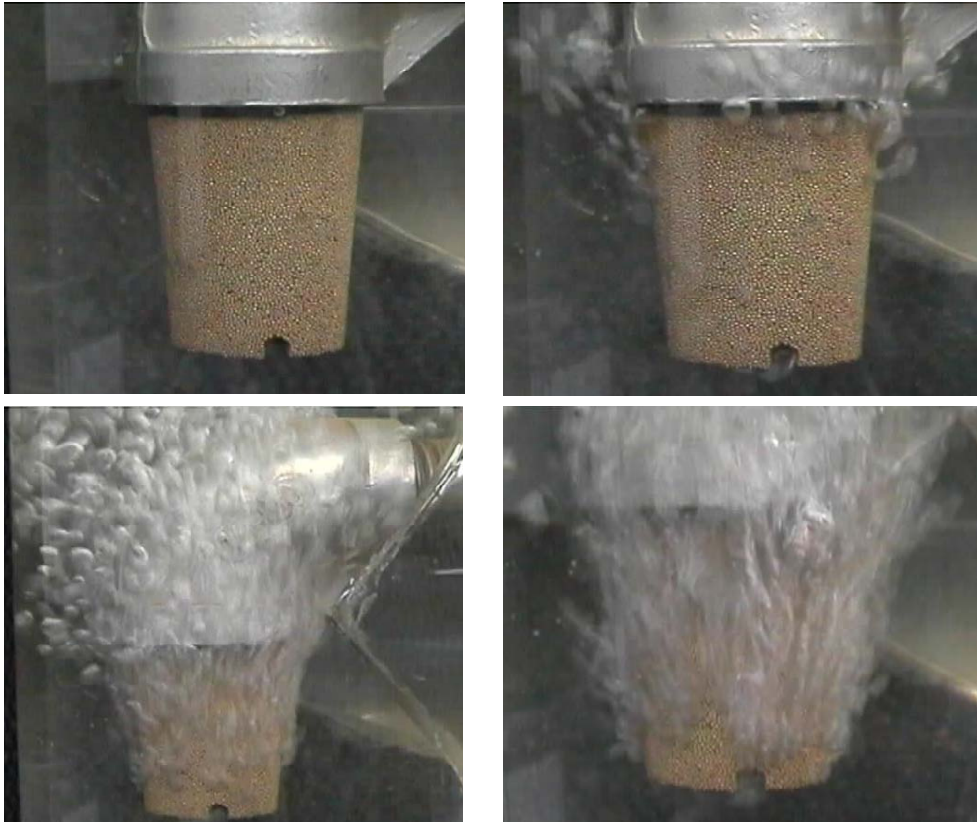


Bild 10.04: Zeigt das Sintermaterial mit Luftdurchsätzen

10.1 Diagramme

Die nachfolgenden Diagramme 10.01 bis 10.17 zeigen die einzelnen Messkurven der zweiten Messreihe mit verschiedenen Luftvolumen Anteilen. Die blaue Kurve im Diagramm 10.01 ist die des Messgrätes zur Messung der Zwei-Phasen-Strömung, wo hingegen die grüne Kurve die des Referenzgerätes ist. Im Diagramm 10.02 ist die braune Kurve die der Referenzdichte und die grüne die des Messgerätes, welches zur Messung der Zwei-Phasen-Strömung eingesetzt wurde. Die rote Kurve repräsentiert den Referenzdruck.

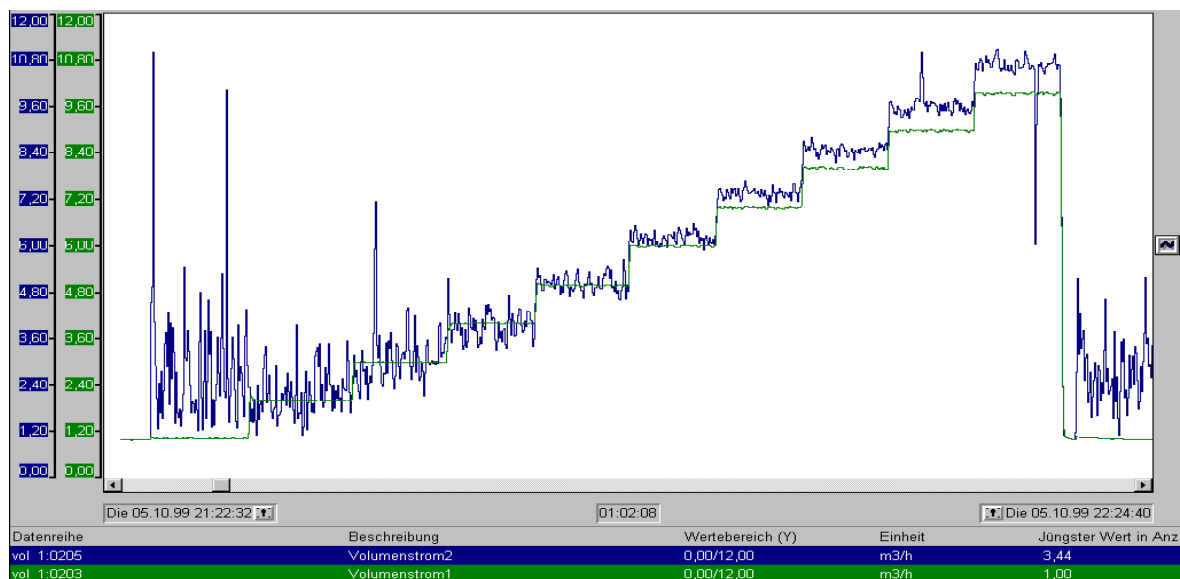


Diagramm 10.01: Zeigt die beiden Massenströme mit 1 Vol.% Luftanteil

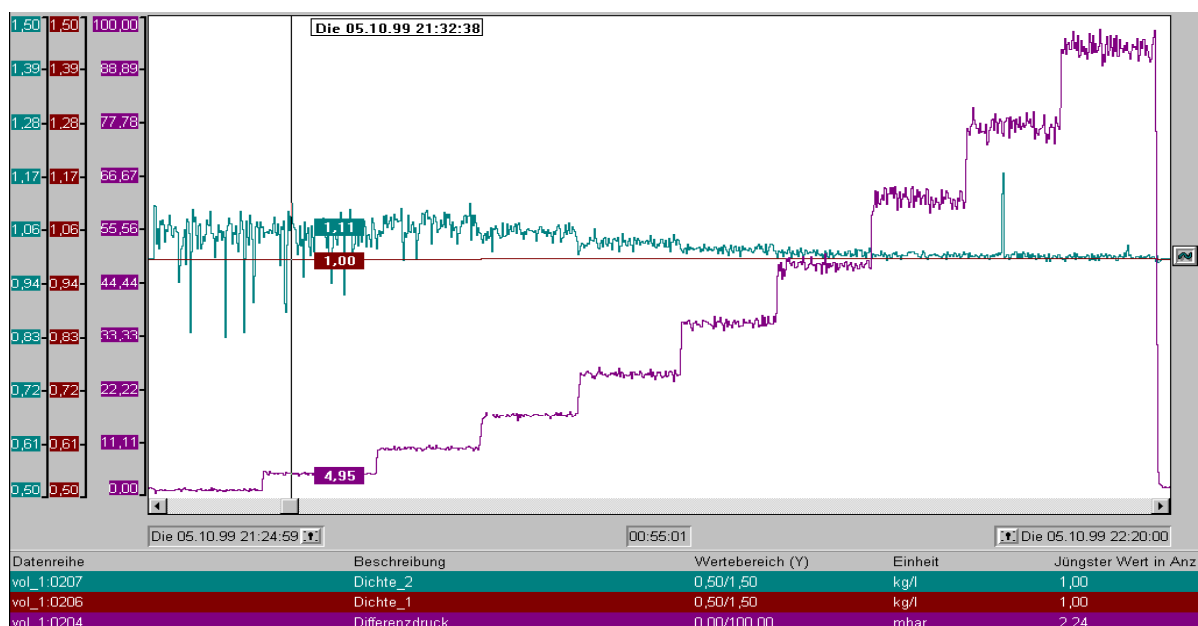


Diagramm 10.02: Zeigt die beiden gemessenen Dichten und den Differenzdruck bei 1Vol.% Luftanteil.

Wie man anhand des Diagramms 10.01 erkennen kann, ist der Einfluss der eingedüsten Luft bei Massenströmen von 1000kg/h – 4000kg/h wesentlich grösser, als bei höheren Massenströmen; dies liegt daran, dass die Luftblasen bei den niedrigeren Fließgeschwindigkeiten mehr Zeit haben, sich zu grossen Blasen zusammen zu formen und ein grösseres Ungleichgewicht im Rohr zu erzeugen, als es kleine feine Blasen tun. Der größer werdende Differenzdruck bei höheren Massenströmen könnte ebenso zur verbesserten Messgenauigkeit beitragen. Bei zunehmendem Massendurchfluss kann beobachtet werden, dass erst ein Einschwingen mit kleinen Amplituden um den Sollwert des Referenzgerätes eintritt und im Anschluss daran sich ein fast konstanter, aber zu hoher Wert einstellt.

Parallel dazu kann bei der Messung der Dichte, siehe Diagramm 10.02, ein starkes Schwingungsverhalten bis zu einem Massenstrom von 4000 kg/h beobachtet werden, danach schwingt der Wert ab 7000kg/h leicht über dem Sollwert von 1 kg/l. Das zu hohe Anzeigen von Dichtewerten liegt wahrscheinlich daran, dass sich eine höhere Resonanzfrequenz einstellt und somit ein schwereres Medium vorgetäuscht wird.

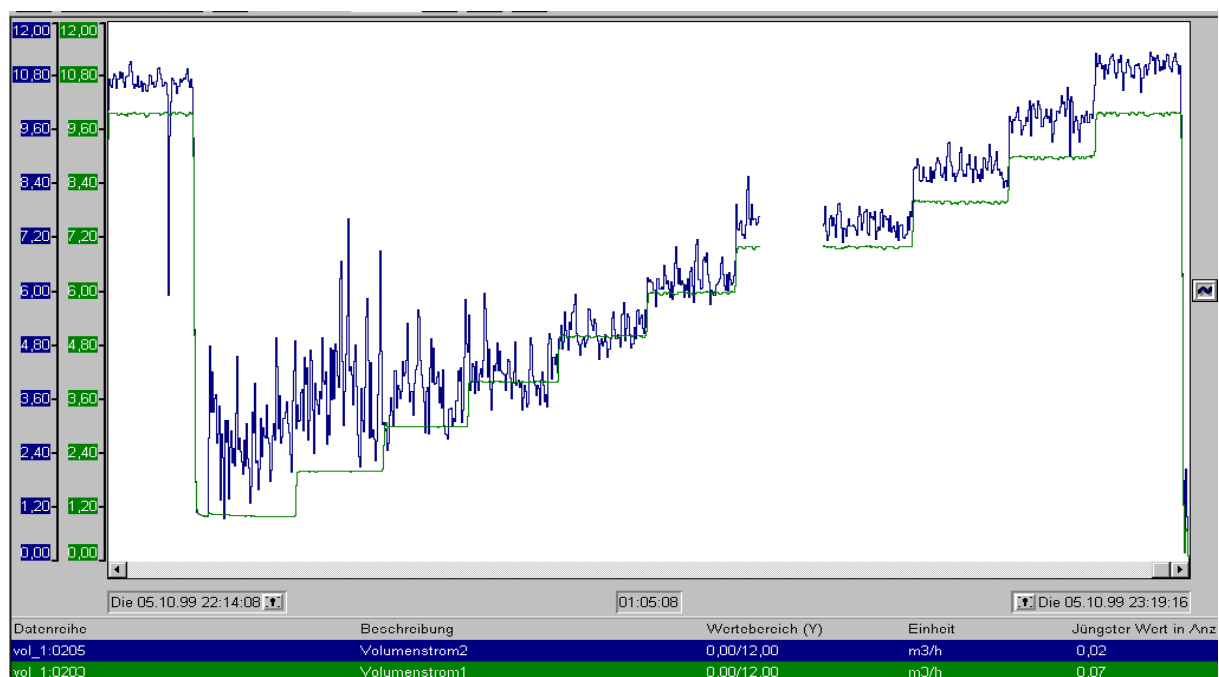


Diagramm 10.03: Zeigt die beiden Massenströme mit 1,5Vol.% Luftanteil

In dieser Darstellung ist zu erkennen, dass zum einen mit zunehmendem Luftvolumenstrom die Amplituden des Messgerätes größer werden, also ein größerer Streubereich des Messwertes auftritt und zum anderen die Annäherung an den Sollwert erst zu einem späteren Zeitpunkt geschieht. In den nachfolgenden Diagrammen sind diese Verhaltensmuster nicht nochmals erklärt es werden lediglich Tendenzen dargestellt.

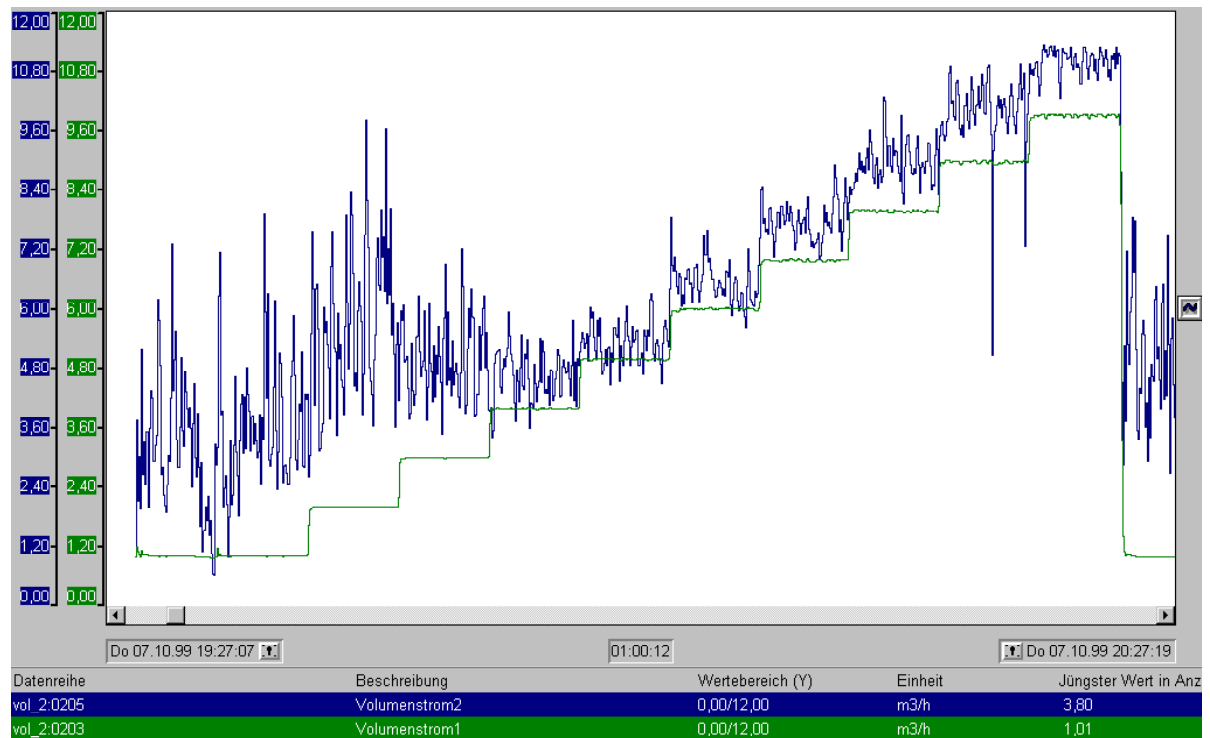


Diagramm 10.04: Zeigt die beiden Massenströme mit 2Vol.% Luftanteil

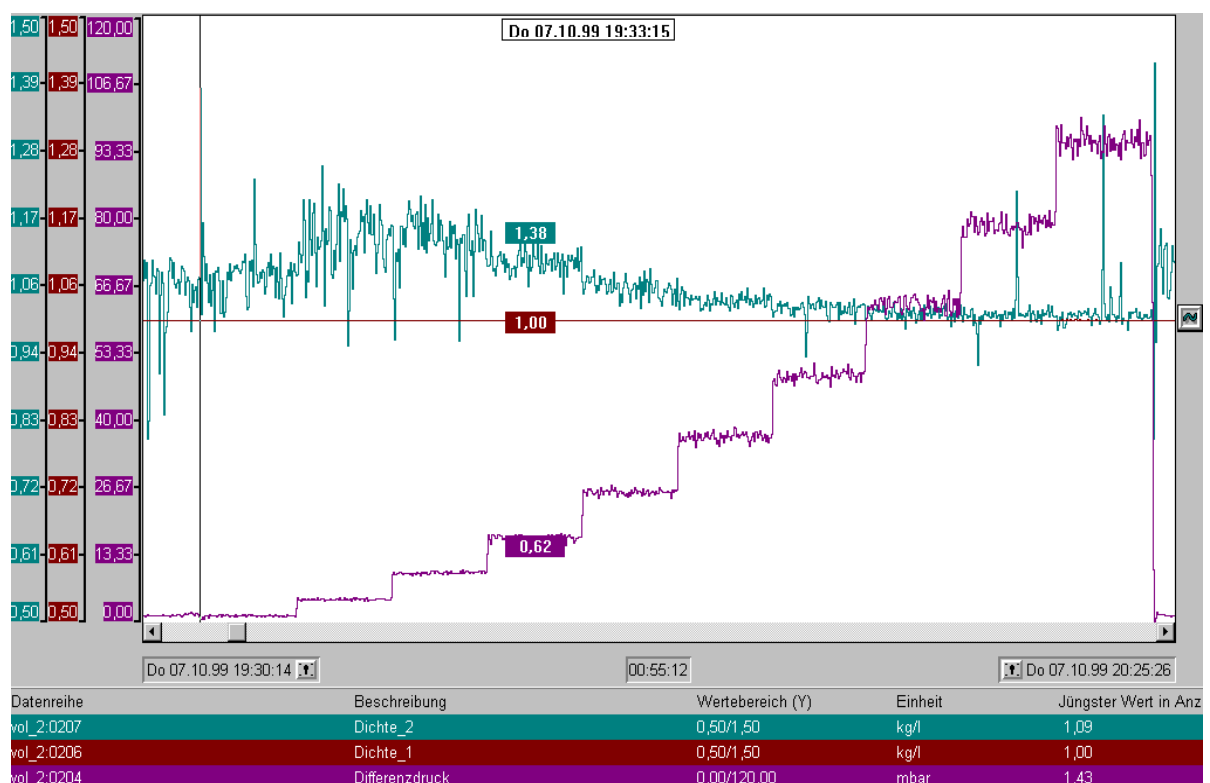


Diagramm 10.05: Zeigt die beiden gemessenen Dichten und den Differenzdruck bei 2Vol.% Luftanteil.

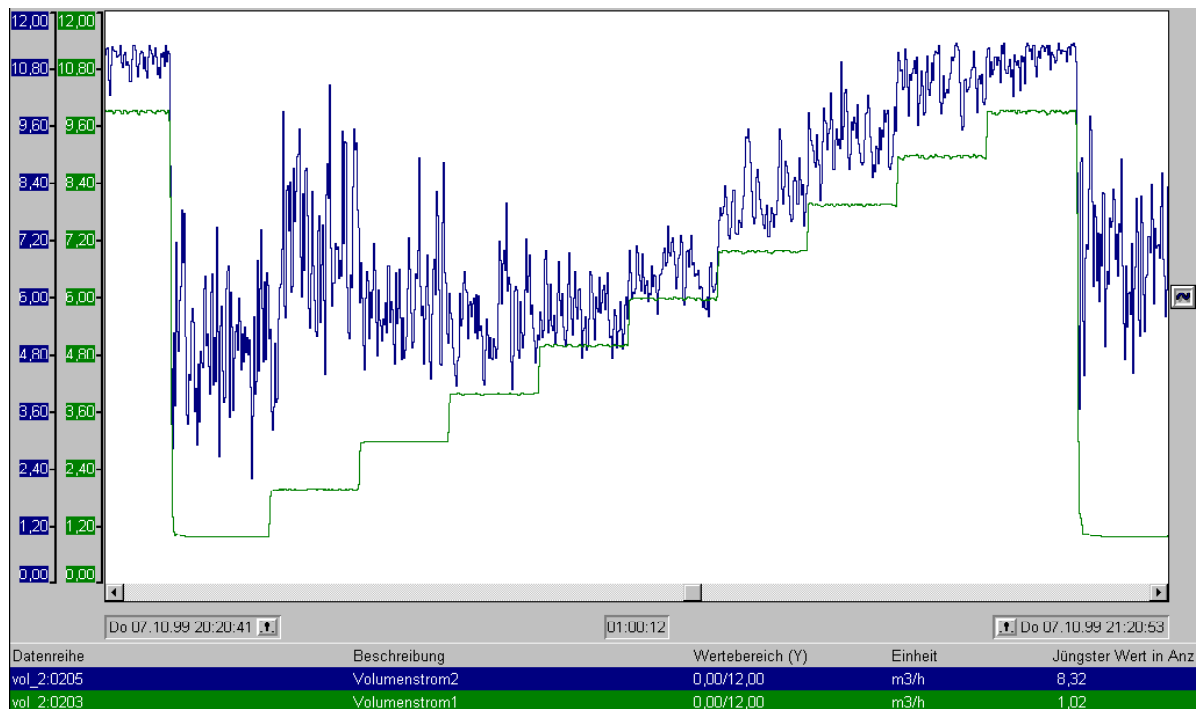


Diagramm 10.06: Zeigt die Messkurven mit 2,5Vol.% Luftanteil

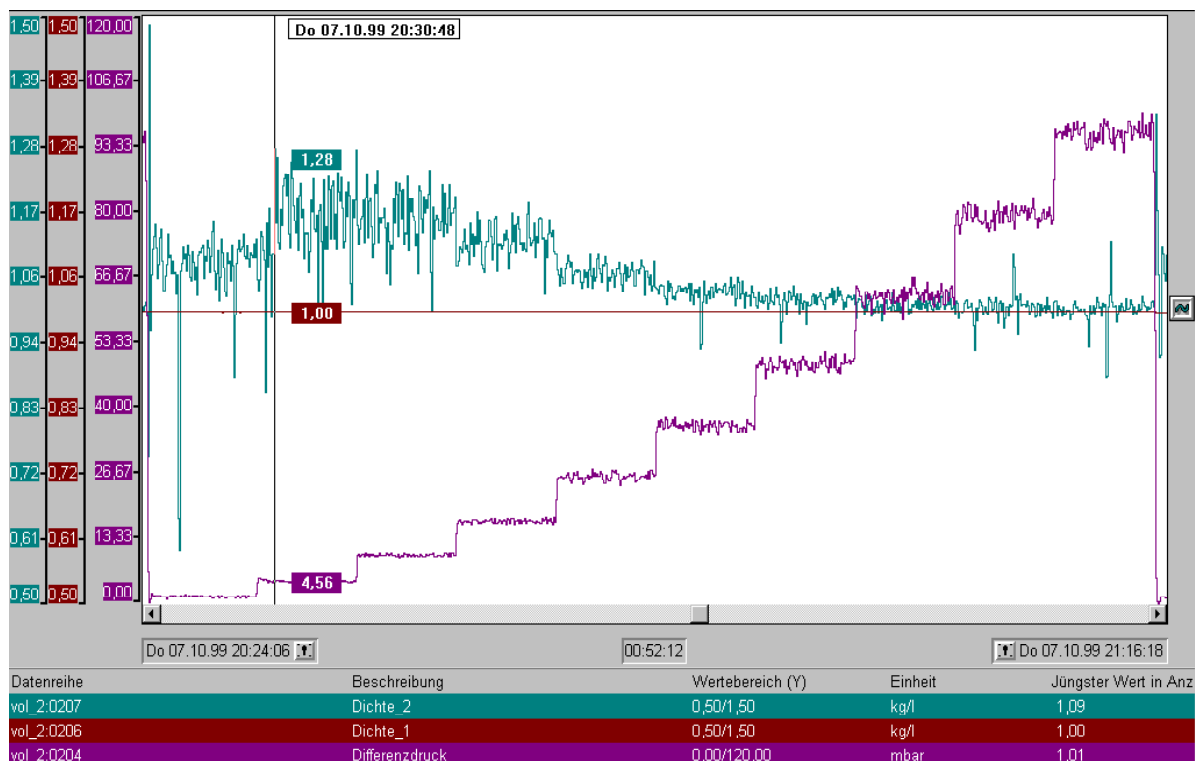


Diagramm 10.07: Zeigt die beiden gemessenen Dichten und den Differenzdruck bei 2,5 Vol.% Luftanteil.

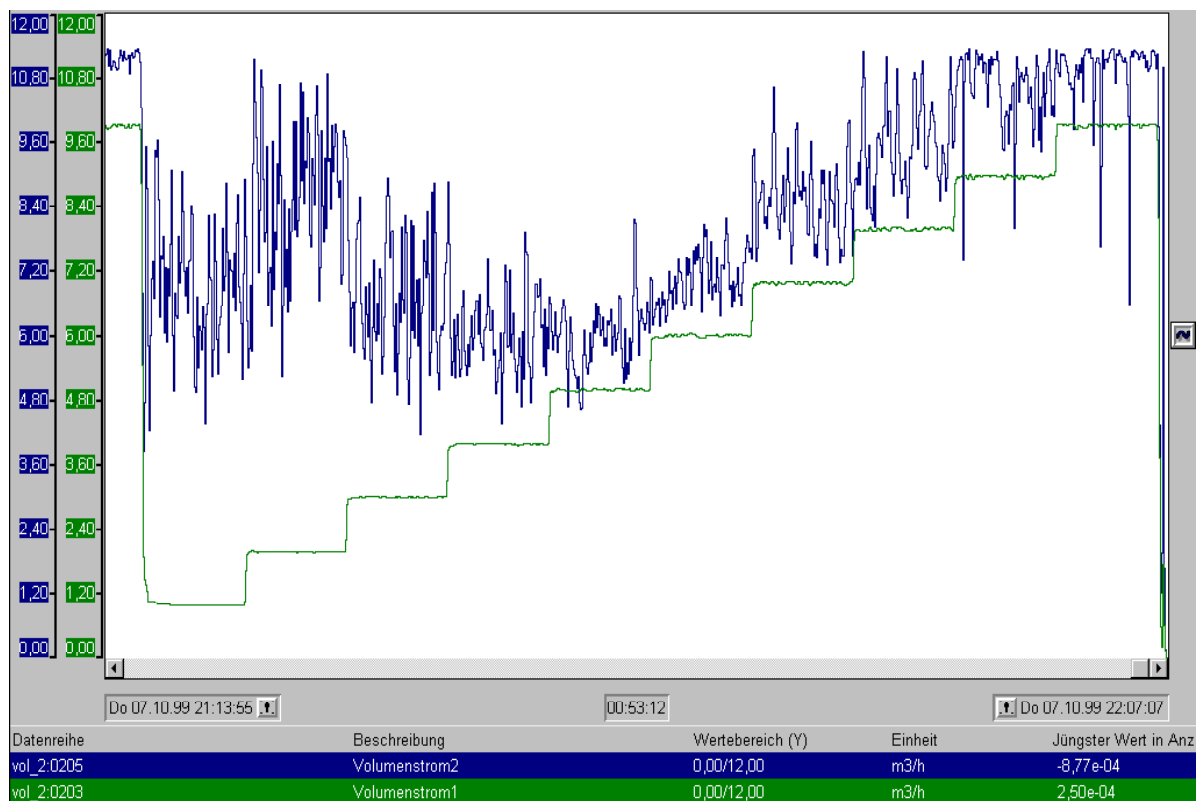


Diagramm 10.08: Zeigt die Messkurven mit 3Vol.% Luftanteil

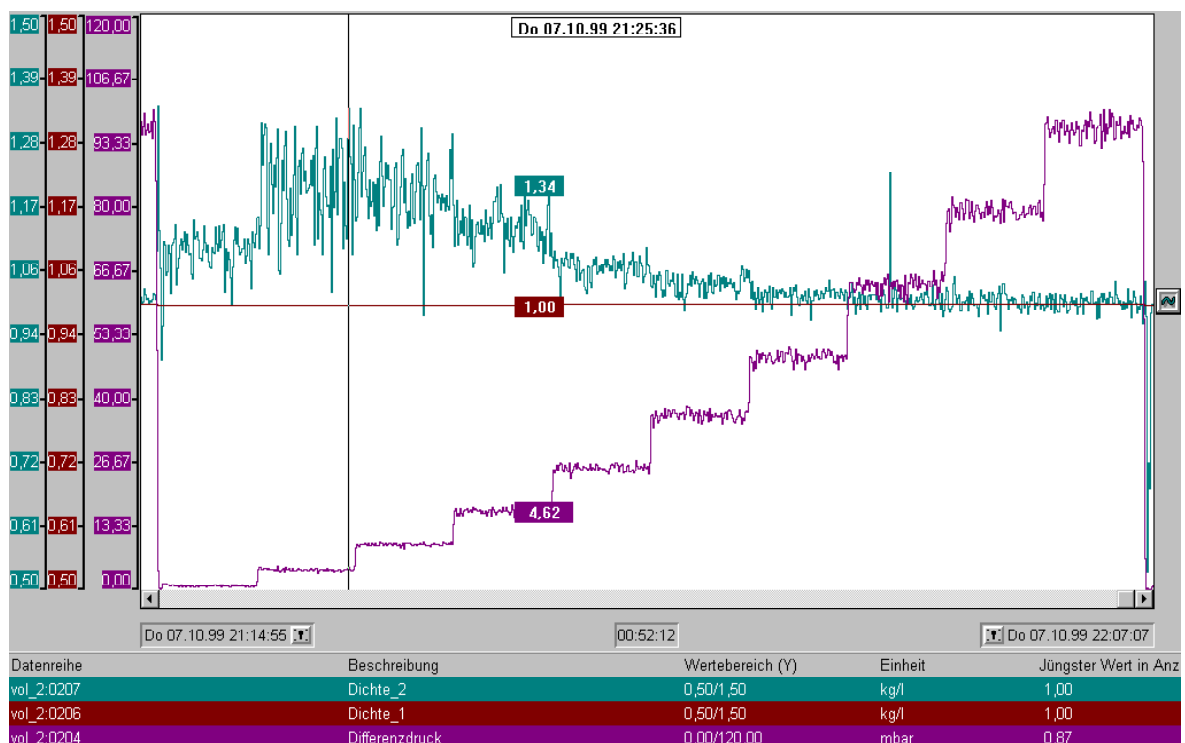


Diagramm 10.09: : Zeigt die beiden gemessenen Dichten und den Differenzdruck bei 3Vol. % Luftanteil.

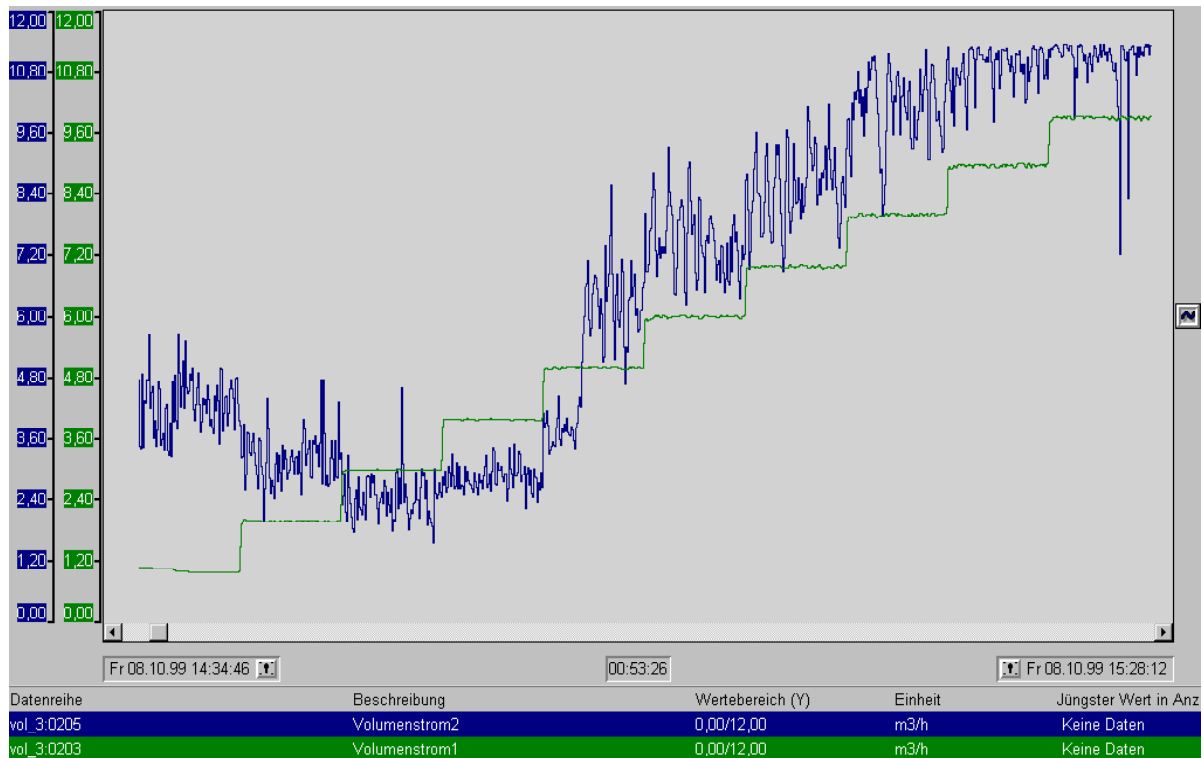


Diagramm 10.10: Zeigt die Messkurven mit 3,5Vol.% Luftanteil

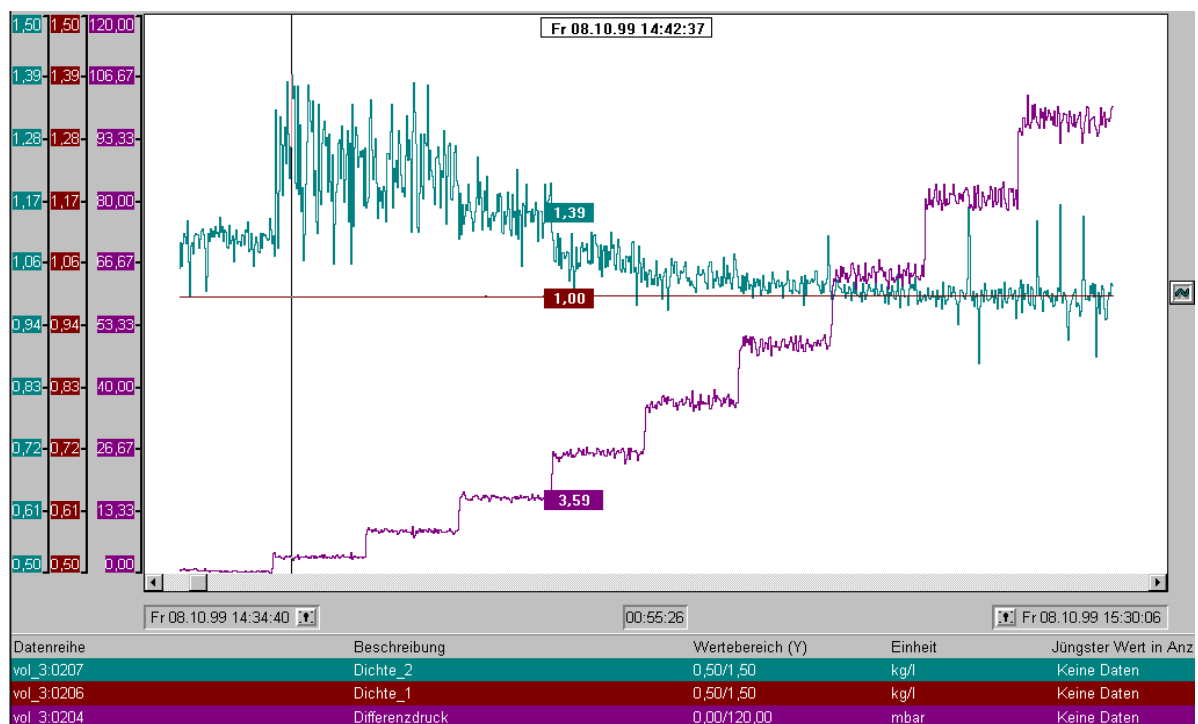


Diagramm 10.11: Zeigt die beiden gemessenen Dichten und den Differenzdruck bei 3,5 Vol. % Luftanteil.

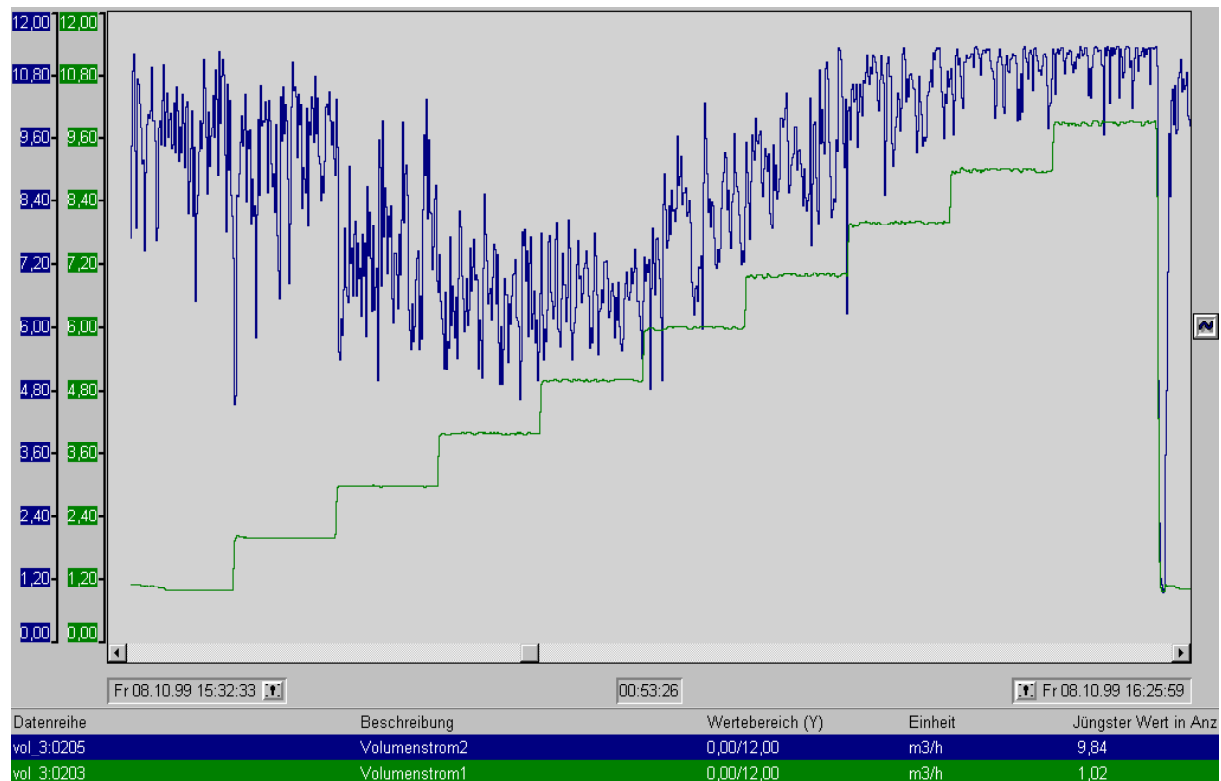


Diagramm 10.12: Zeigt die Messkurven mit 4Vol.% Luftanteil

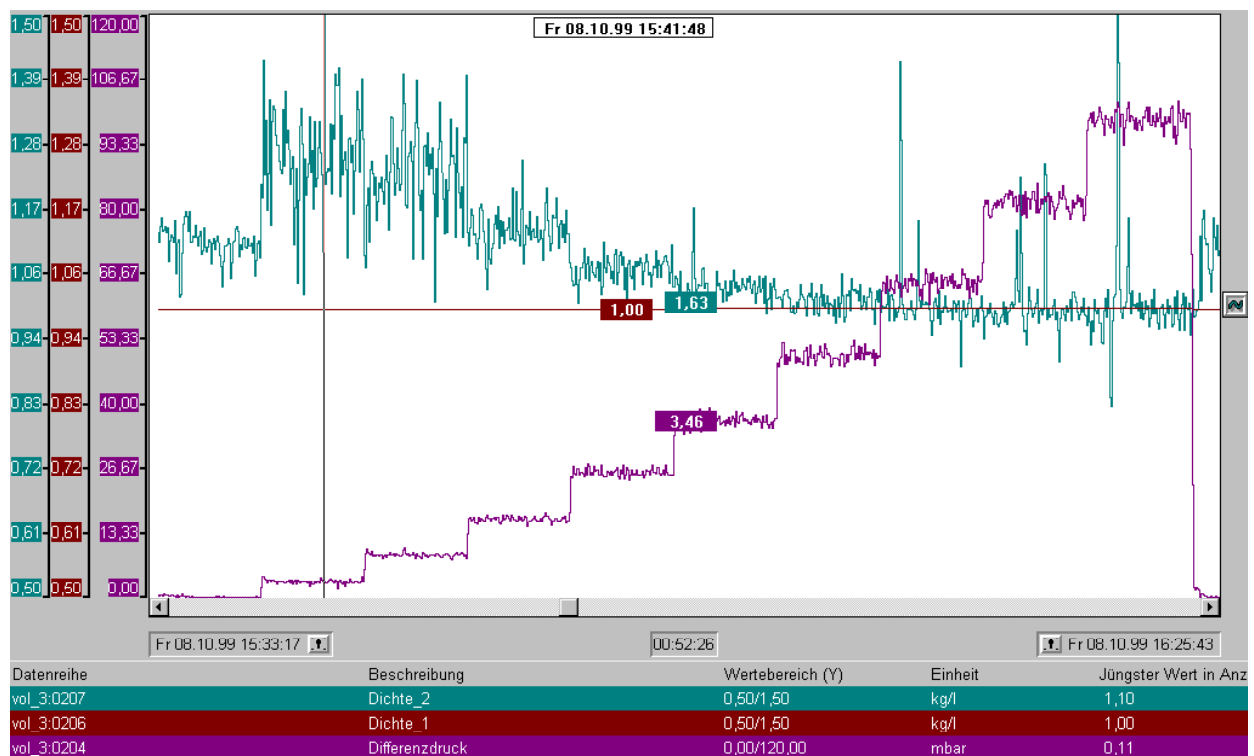


Diagramm 10.13: : Zeigt die beiden gemessenen Dichten und den Differenzdruck bei 4 Vol. % Luftanteil.

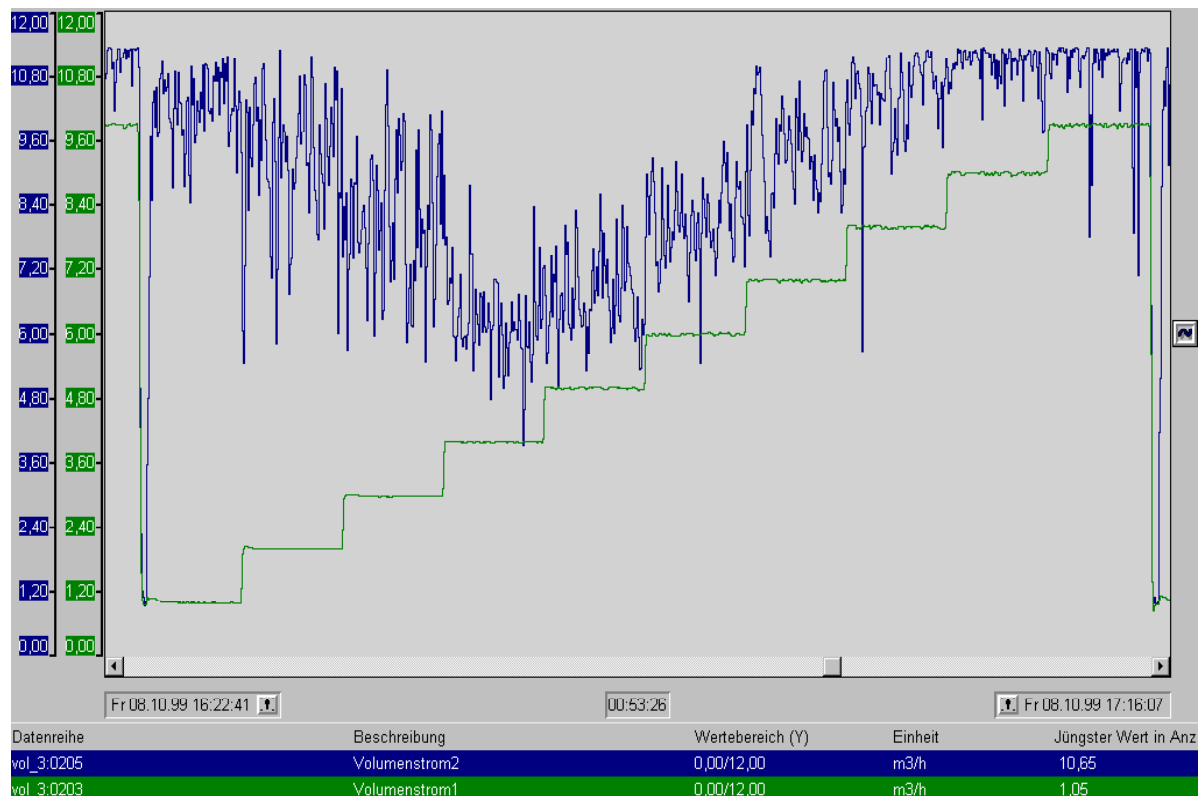


Diagramm 10.14: Zeigt die Messkurven mit 4,5Vol.% Luftanteil

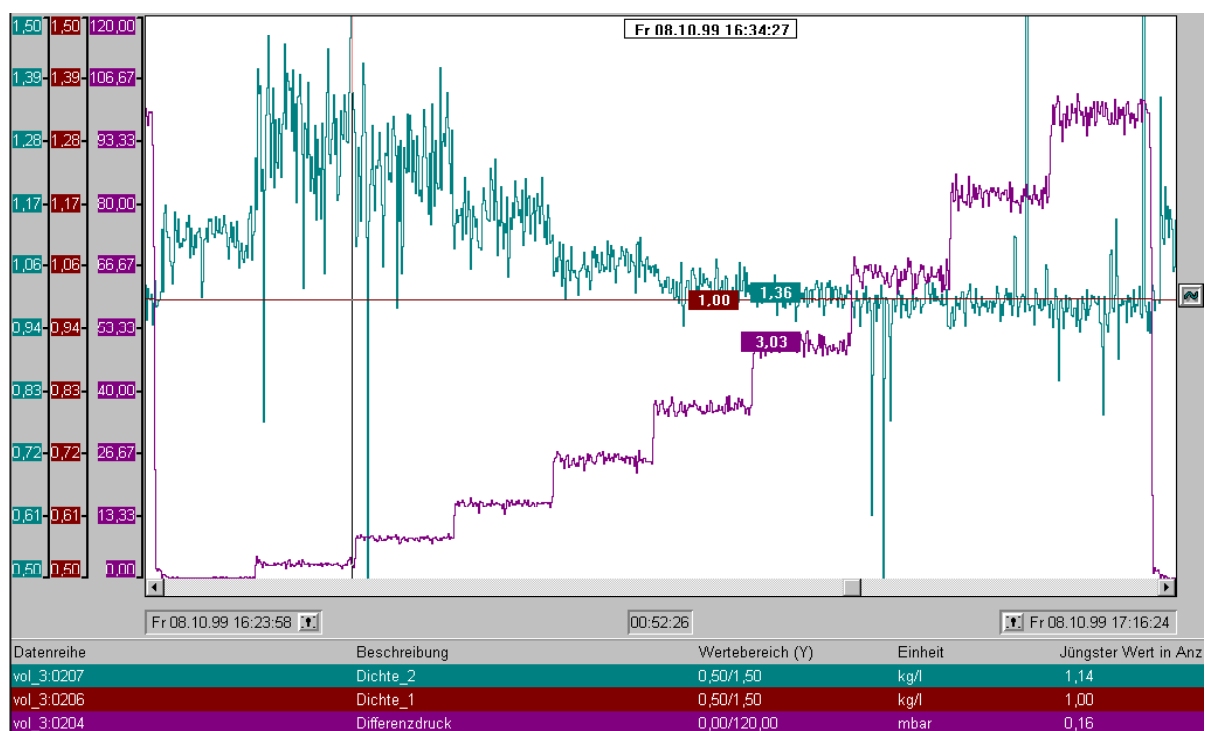


Diagramm 10.15: Zeigt die beiden gemessenen Dichten und den Differenzdruck bei 4,5 Vol. % Luftanteil.

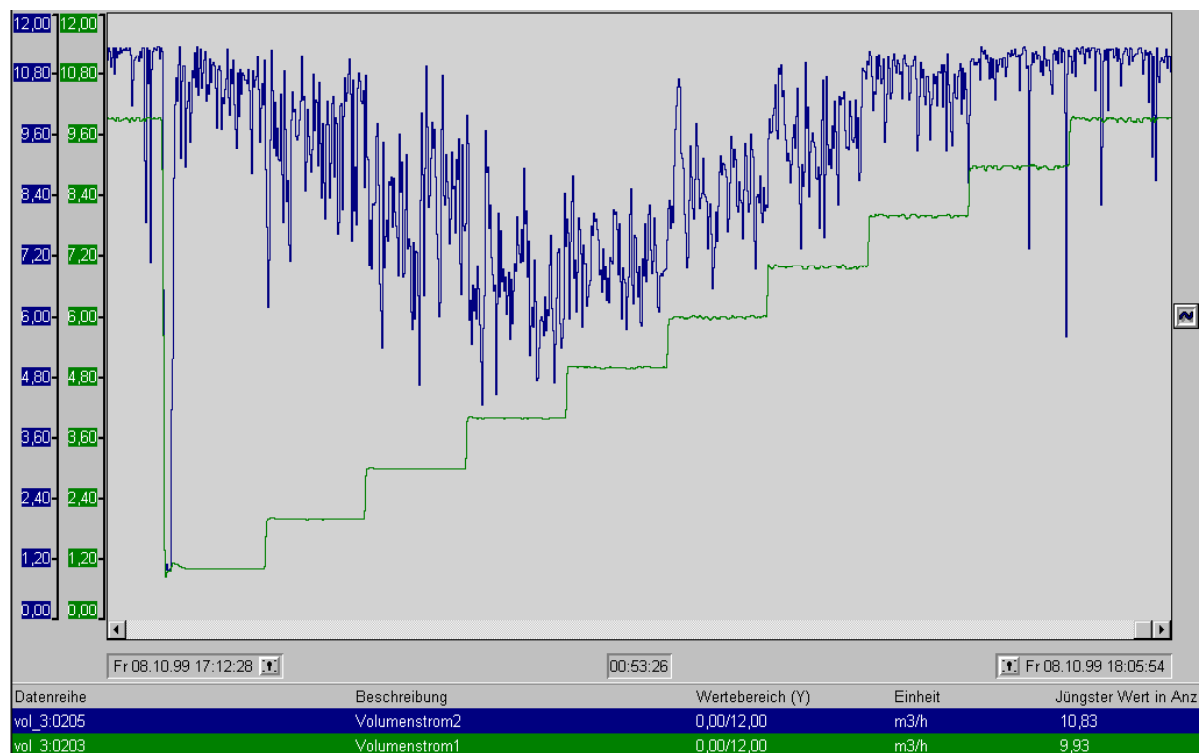


Diagramm 10.16: Zeigt die Messkurven mit 5Vol.% Luftanteil

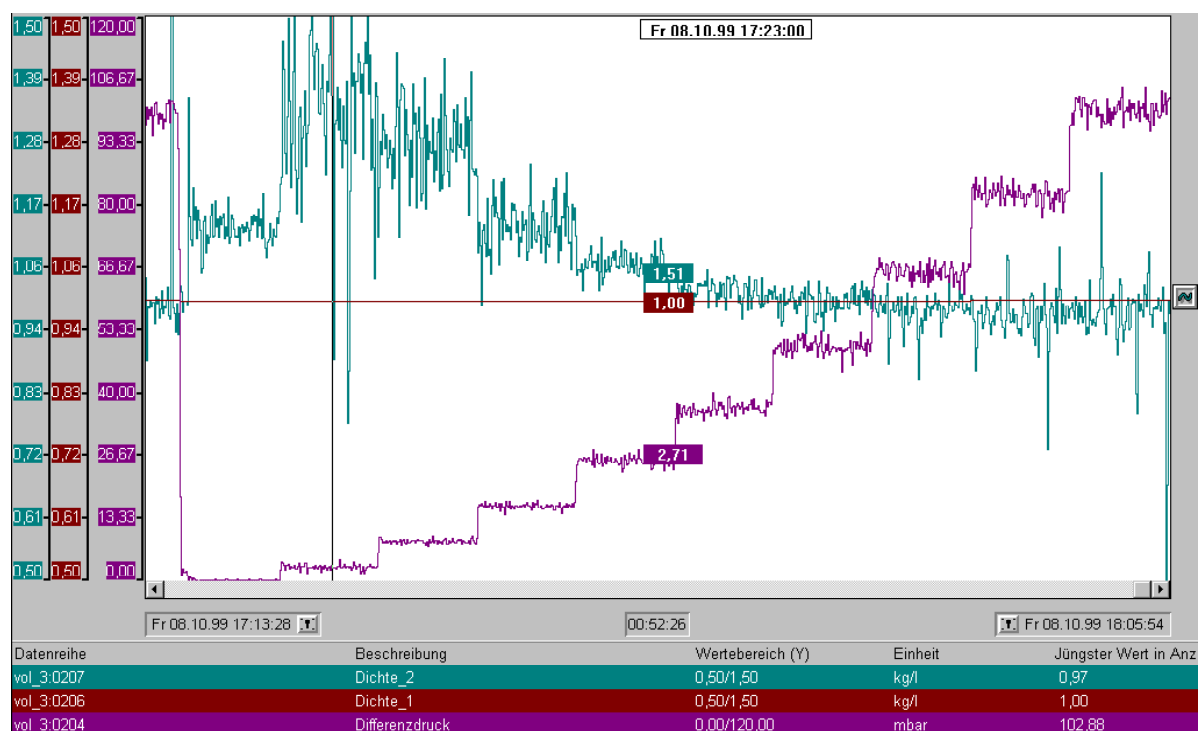


Diagramm 10.17: Zeigt die beiden gemessenen Dichten und den Differenzdruck bei 5Vol. % Luftanteil.

10.2 Versuchsauswertung der Fehlerkurven

10.2.1 Abweichungen des Massenstroms

Die folgenden Diagramme 10.18 und 10.19 geben die gemessenen Werte der zweiten Messreihe in zwei verschiedenen Varianten wieder, zum einen in der üblichen Darstellung % - Abweichung über dem Sollmassenstrom und zum anderen in der absoluten Darstellung, darunter versteht man die Auftragung der Massenstromdifferenz über dem Sollmassenstrom.

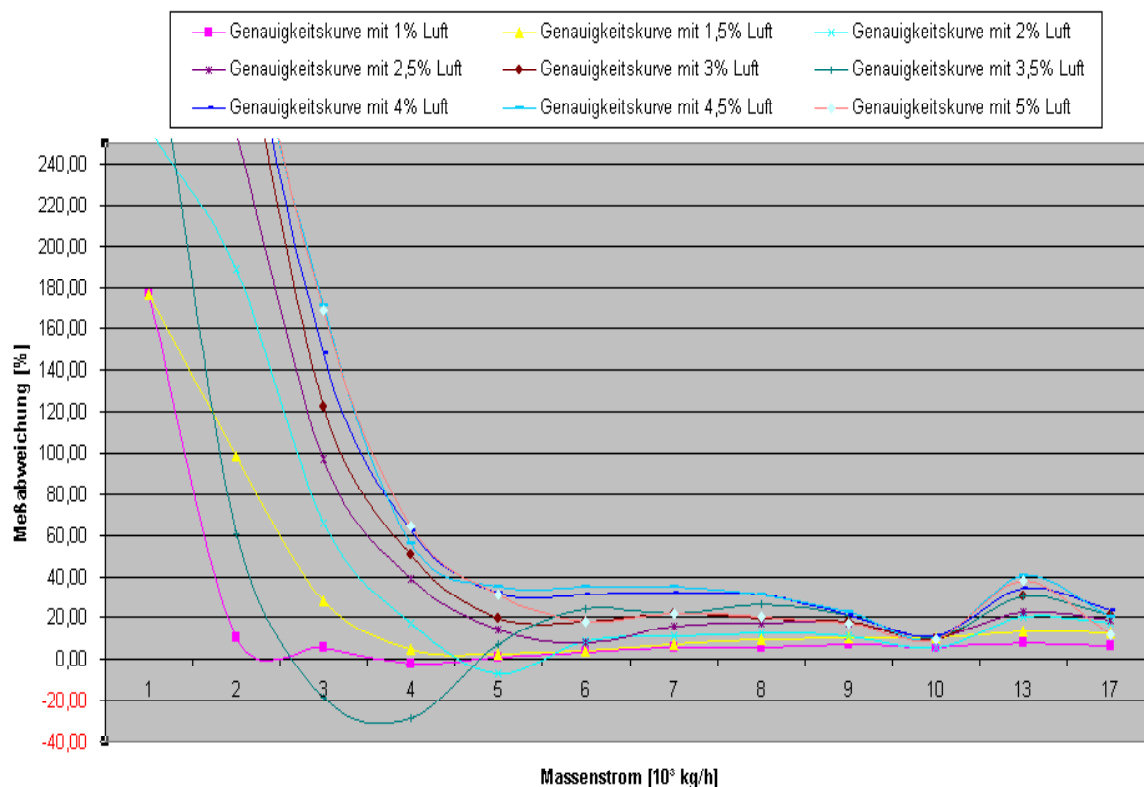


Diagramm 10.18: Zeigt die Fehlerkurven in der relativen Abweichung des Massenstroms

Wie auch schon die vorangegangenen Diagramme gezeigt haben, steigt die Messungenauigkeit mit zunehmendem Luftvolumenanteil an. Zwar verringert sich die Abweichung zu Beginn der Messung also bei zunehmendem Massenstrom recht stark, bleibt aber mit 5-40% Abweichung vom Sollwert immer noch zu hoch. Eine deutliche Annäherung an den Sollwert kann bei $10 \cdot 10^3 \text{ kg/h}$ beobachtet werden. Jetzt sollte man eigentlich davon ausgehen können, dass sich die Messabweichung immer mehr dem Sollwert annähert.

Wie man aber sieht, kamen bei der Messung des Massenstroms $13 \cdot 10^3 \text{ kg/h}$ wieder höhere Werte als erwartet heraus, hingegen sich die Abweichungen bei einem Massenstrom von $17 \cdot 10^3 \text{ kg/h}$ wieder dem Sollwert annäherten.

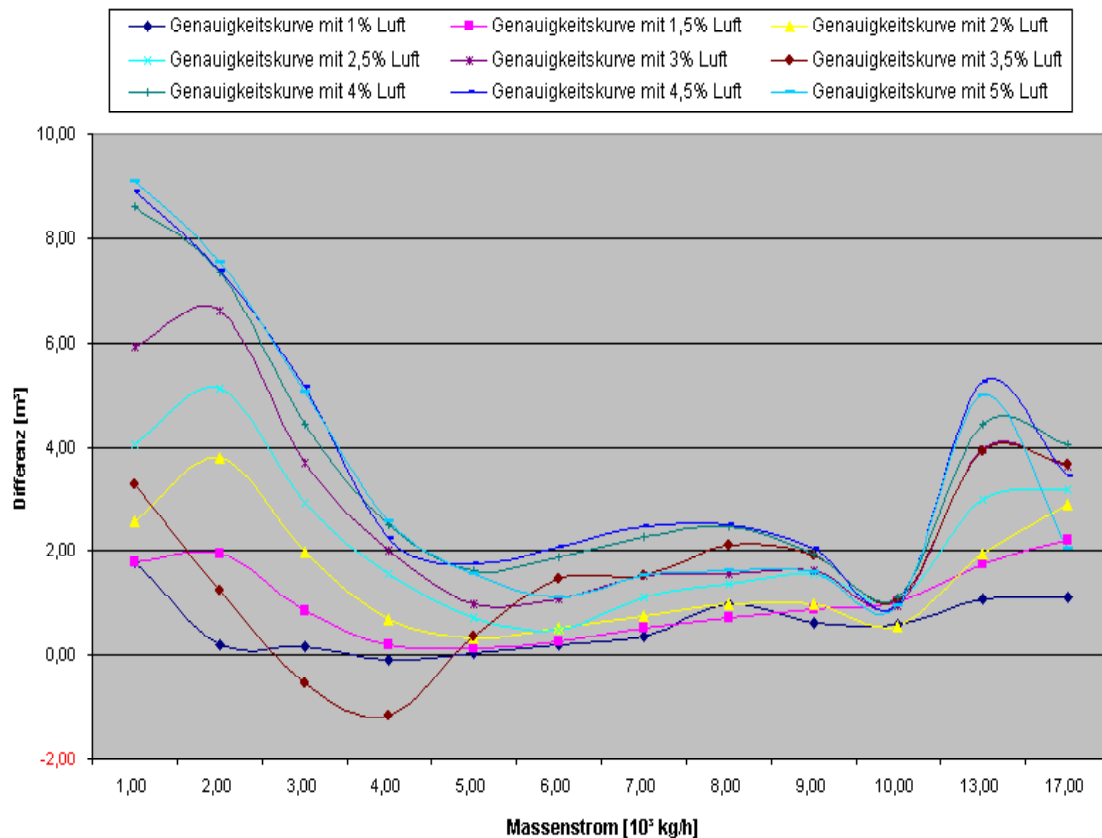


Diagramm 10.19: Zeigt die Fehlerkurven in der absoluten Abweichung des Massenstroms

In dieser Darstellung wird noch deutlicher, dass die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit mit zunehmendem Luftvolumenanteil begrenzt ist und nicht den gewünschten Effekt der Reduzierung der Messabweichung zur Folge hatte.

Vielmehr sieht man einen leichten Anstieg der Messungenauigkeiten, dies lässt sich mit großer Wahrscheinlichkeit auf starke Verwirbelungen der Luft im Meßgerät zurückführen, oder es handelt sich um eine Eigenschaft des Schwingendensystems.

10.2.2 Abweichungen der gemessenen Dichten

In den beiden nachfolgenden Diagrammen 10.20 und 10.21 sind die gemessenen Dichten jeweils wieder in der relativen und absoluten Darstellung aufgetragen.

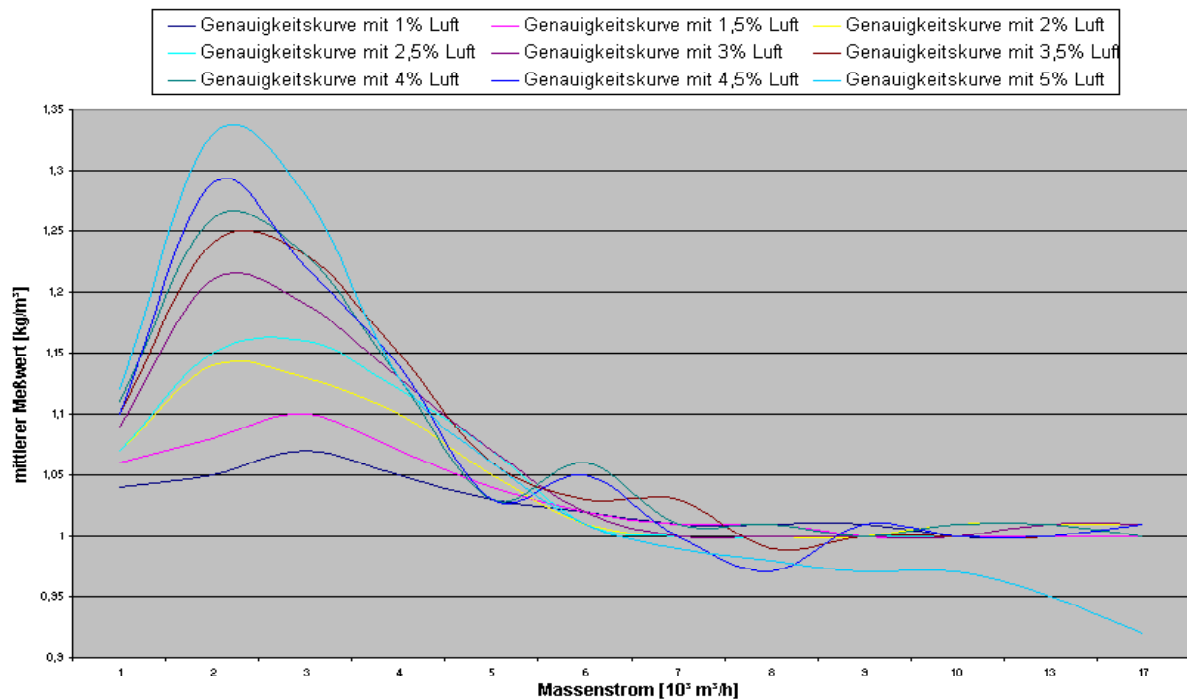


Diagramm 10.20: Zeigt die gemessenen Dichtewerte in der absoluten Darstellung

Wie man an dem Diagramm 10.20 erkennen kann, steigt der Dichtewert zu Beginn der Messung weit über den des Sollwertes von 1 kg/l an. Erreicht bei einem Massenstrom 2500 kg/h mit einem Wert von 1,33 kg/l sein Maximum und pendelt sich ab einem Massenstrom von 7000 kg/h um den Sollwert ein. Bei der Genauigkeitskurve von 5 Vol % Luftanteil sieht man, dass das Messrohr ab einem Massenstrom von 6000 kg/h so stark mit Luft gefüllt sein muss, dass die Dichte weit unter 1 kg/l fällt.

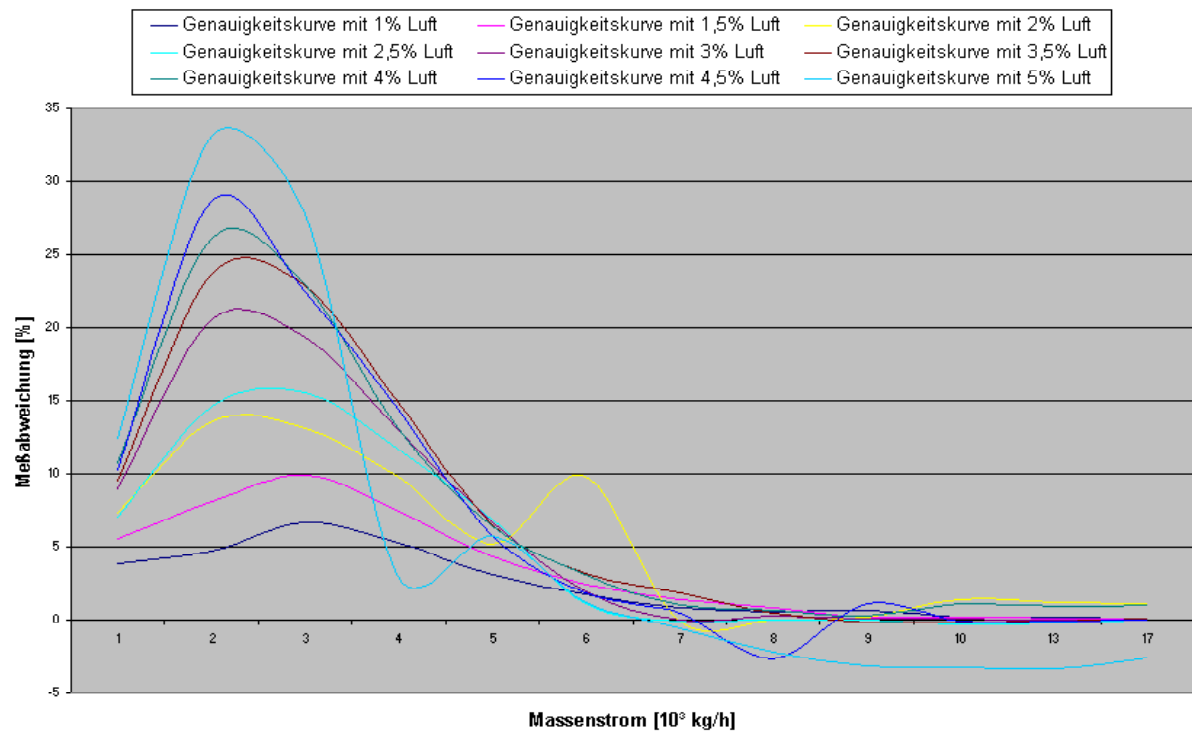


Diagramm 10.21: Zeigt die gemessenen Dichtewerte in der relativen Darstellung

In dem Diagramm 10.21 lässt sich sehr schön erkennen, dass ein starkes Schwingungsverhalten die Dichtemessung beeinflusst, welches aus dem Diagramm 10.20 nicht so deutlich zuerkennen war.

11 Zusammenfassung und Ausblick

Der Aufbau des Versuchsstandes sollte zur Simulierung verschiedener Betriebszustände von Zwei-Phasen-Strömungen dienen, die Möglichkeit zum Einsatz unterschiedlicher Messgeräte wurde realisiert.

Es stellte sich als schwierig heraus, eine klar definierte Luftmenge zur Eindüsung zu bringen, dies lag zum einen an den nicht klar definierten Druckverhältnissen in der Versuchsanlage und dem Druckluftsystem der Fachhochschule, welches über einen Speicherbehälter betrieben wird.

Durch mehrmaliges Auslittern eines klar definierten Volumens und die Aufnahme der benötigten Zeit, konnten die Unklarheiten beseitigt werden und die richtige Handhabung der Luft-eindüsung war gewährleistet. Der nachfolgenden Diplomarbeit soll es überlassen bleiben, genauere Messgeräte zu Luftvolumenstrommessung einzusetzen.

Es konnten gut reproduzierbare Messwerte aufgenommen und dokumentiert werden, welche die Messungenauigkeiten bei verschiedenen Betriebszuständen aufgezeigt haben.

Wie man an Hand dieser Diagramme ansehen kann, wäre es von großem Interesse, das Verhalten bei noch höheren Massenströmen zu untersuchen, das System in verschiedenen Druckstufen zu betreiben und die Abstufung der Lufteindüsung noch zu verfeinern. Dies ermöglicht unter Umständen die genaue Festlegung des Betriebspunktes an dem die Messgeräte ihre Genauigkeit verlieren.

12 Anhang

12.1 Literaturverzeichnis

- [1] National Geographic, März 1999
- [2] Sonderdruck, Massendurchflussmessung mit Hilfe der Coriolis-Kraft der Firma Schwing Verfahrenstechnik GmbH, D- 47506 Neukirchen-Vluyn
- [3] Produktunterlagen von Prof. Dr. J. Goeke
- [4] O. Fiedler; Strömungs und Durchflussmesstechnik Oldenbourg Verlag 1992
- [5] Skript Prof. Dr. J. Goeke
- [6] Bonfig, k; Technische Durchflussmessung unter besonderer Berücksichtigung neuartiger Durchflussverfahren. Vulkan Verlag, Essen 1987
- [7] Prof. Dr.-Ing. K. W. Bonfig, Das Handbuch für Ingenieure Sensoren und Sensorsysteme von Expert Verlag 1991
- [8] Produktunterlagen der Firma Endress & Hauser Messtechnik GmbH & Co., Postfach 2222, 79574 Weil am Rhein
<http://www.endress.com>
- [9] Produktunterlagen der Firma Grundfos
- [10] Produktunterlagen der Firma Krohne Messtechnik GmbH & Co. KG, Postfach 100862, 4100 Duisburg
- [11] Produktunterlagen der Neways-Group
- [12] Johannes Prock Einführung in die Prozessmeßtechnik, Stuttgart :Teubner 1997
- [13] Johannes Niebuhr und Gerhard Physikalische Messtechnik mit Sensoren Oldenburg Verlag Lindner München 1996
- [14] Steffen, W. ; Stumm, W; Direkte Massendurchflussmessung, insbesondere mit Coriolisverfahren. PTB-Bericht, PTB-MA-10, 1987, S. 128-158
- [15] Produktunterlagen der Firma Bronkhorst B.V. , Ruurlo Niederlande, 1994. Liqui-Flow, Massendurchflussmesser für Flüssigkeiten
- [16] Brucker A. ; Umbach, H. ; Tendenzen bei der Messung von Durchflüssen. atp 34 (1992), S.224-233
- [17] Hans J. Paus. Physik in Experimenten und Beispielen. Carl Hanser Verlag München Wien, S.117-118
- [18] G. Strohrmann, Messtechnik in Chemiebetrieben. Einführung in das Messen verfahrenstechnischer Größen, Oldenburg Verlag München Wien 1997

- [19] Schmidt, Buchmann, Hesse, Mebus. Grundlagen der Chemie. Stam-Verlag, Köln
München
- [20] Bonfig, Bartz, Wolff. Sensoren und Messwertaufnehmer expert verlag
- [21] Prof. Dr.-Ing. K. W. Bonfig. Technische Durchflussmessung unter Berücksichtigung
neuartiger Verfahren. Vulkan Verlag Essen. 2. Auflage

12.2 Verwendete Zeichen und Einheiten

Zeichen	Bezeichnungen	Einheiten
δ	Dichte	kg/m ³
ω	Kreisfrequenz	Hz
α	Winkel	°
m	Masse	kg
Re	Reynoldszahl	-
t	Zeit	s
v	Geschwindigkeit	m/s
q_m	Massenstrom	kg/h
F_c	Corioliskraft	N
r	Abstand	m
L	Länge des Rohrschenkels	m
K_s	Steifigkeitskonstante	-
A	Fläche	m ²
d	Durchmesser	m
\dot{V}	Volumetrische Durchsatzmenge	m ³ /h
U_c	Messunsicherheit	%
e_s	Spezifizierte Genauigkeit	%
N	Nullpunktstabilität	kg/min

12.3 Exeltabellen

m³	1% Luft			1,5% Luft		
	min.	mittlere	max.	min.	mittlere	max.
	%	%	%	%	%	%
1	-180,02	176,51	533,03	-48,06	176,64	401,35
2	-61,29	9,91	81,11	-33,32	98,16	229,64
3	-104,12	5,85	115,81	-65,00	28,11	121,23
4	-19,32	-2,10	15,15	-23,36	4,81	32,99
5	-10,61	0,73	12,07	-13,26	2,45	18,16
6	-2,41	3,46	9,32	-8,81	4,40	17,60
7	0,90	5,29	9,86	0,06	7,24	13,88
8	2,72	5,96	9,20	2,46	9,12	15,78
9	-1,67	6,90	15,48	-4,86	9,94	24,74
10	-24,86	5,91	36,68	6,11	10,04	13,96
13	-19,11	8,29	35,69	-12,07	13,30	38,68
17	-18,17	6,50	31,17	0,45	12,96	25,48
m³	2% Luft			2,5% Luft		
	min.	mittlere	max.	min.	mittlere	max.
	%	%	%	%	%	%
1	-97,91	257,25	612,41	158,07	403,95	649,83
2	38,64	188,90	339,16	116,52	254,83	393,14
3	-3,60	65,84	135,28	15,15	97,11	179,07
4	-7,48	17,28	42,04	-4,37	39,18	82,72
5	-11,26	-6,50	24,26	-6,33	14,16	34,65
6	-5,17	8,49	22,15	-6,21	8,02	22,25
7	-3,76	10,88	25,51	0,08	15,69	31,30
8	-1,84	12,25	26,34	2,78	16,86	30,95
9	-19,45	10,90	41,26	8,70	17,42	26,15
10	-28,72	5,43	39,58	4,53	10,33	16,14
13	-9,12	20,01	49,15	-6,43	23,01	52,46
17	1,27	16,92	32,57	-15,22	18,63	52,48
m³	3% Luft			3,5% Luft		
	min.	mittlere	max.	min.	mittlere	max.
	%	%	%	%	%	%
1	319,44	592,34	865,54	166,15	328,36	490,58
2	215,61	330,02	444,42	-35,11	60,85	156,81
3	45,31	122,71	200,12	-78,13	-18,14	41,86
4	5,03	50,27	95,52	-43,22	-28,70	-14,19
5	-13,74	19,73	53,19	-33,90	7,42	48,74
6	3,68	17,91	32,14	1,95	24,44	46,92
7	0,64	21,62	42,60	1,35	21,89	42,43
8	4,30	19,66	35,03	10,48	26,45	42,41
9	-16,69	17,84	52,37	11,48	21,16	30,83
10	-17,27	9,37	36,01	-16,49	10,35	37,20
13	-19,47	30,31	80,09	-36,61	30,19	96,99
17	-11,52	21,30	54,13	-17,96	21,45	60,87

Tabelle 12.01 Teil 1: Enthält die prozentualen Abweichungen vom Sollwert

m³	4% Luft			4,5% Luft		
	min.	mittlere	max.	min.	mittlere	max.
	%	%	%	%	%	%
1	647,38	862,18	1076,99	533,58	889,42	1245,26
2	253,09	368,18	483,27	222,74	368,38	514,03
3	63,31	147,55	231,79	89,61	171,34	253,08
4	9,83	62,42	115,01	-11,35	55,76	122,86
5	6,90	32,23	57,57	0,30	34,72	69,15
6	-19,58	31,53	82,64	1,13	34,66	68,18
7	0,32	32,23	64,13	14,76	35,08	55,43
8	2,86	30,91	58,95	-3,03	30,95	64,93
9	12,59	21,47	30,35	12,38	22,67	32,95
10	-0,63	11,15	22,93	-16,40	9,76	35,92
13	-16,03	34,25	84,53	-9,85	40,43	90,71
17	-6,82	23,75	54,33	-13,89	20,18	54,25
m³	5% Luft			ohne Luft		
	min.	mittlere	max.		mittlere	
	%	%	%		%	
1	557,14	911,27	1265,41		0,19	
2	269,57	377,14	484,71		0,15	
3	87,40	168,79	250,14		0,13	
4	-3,71	64,34	132,38		0,12	
5	-22,97	31,47	35,90		0,12	
6	-7,09	18,18	43,45		0,12	
7	-4,29	21,81	47,91		0,11	
8	-15,02	20,07	55,16		0,11	
9	0,45	17,60	34,75		0,11	
10	-20,17	9,30	38,77		0,11	
13	-8,33	38,34	85,34		0,11	
17	-39,15	11,95	63,06		0,11	

Tabelle 12.01 Teil 2: Enthält die prozentualen Abweichungen vom Sollwert

Fehlerkurven als Differenz zum Sollbetrag					
Genauigkeitskurve mit 1% Luft			Genauigkeitskurve mit 1,5% Luft		
Soll:	mittlerer Meßwert:	Differenz:	Soll:	mittlerer Meßwert:	Differenz:
[m³]	[m³]	[m³]	[m³]	[m³]	[m³]
1,00	2,77	1,77	1,00	2,77	1,77
2,00	2,20	0,20	2,00	3,96	1,96
3,00	3,18	0,18	3,00	3,84	0,84
4,00	3,92	-0,08	4,00	4,19	0,19
5,00	5,04	0,04	5,00	5,12	0,12
6,00	6,21	0,21	6,00	6,26	0,26
7,00	7,37	0,37	7,00	7,51	0,51
8,00	8,98	0,98	8,00	8,73	0,73
9,00	9,62	0,62	9,00	9,89	0,89
10,00	10,59	0,59	10,00	11,00	1,00
13,00	14,08	1,08	13,00	14,73	1,74
17,00	18,10	1,10	17,00	19,20	2,20
Genauigkeitskurve mit 2% Luft			Genauigkeitskurve mit 2,5% Luft		
Soll:	mittlerer Meßwert:	Differenz:	Soll:	mittlerer Meßwert:	Differenz:
[m³]	[m³]	[m³]	[m³]	[m³]	[m³]
1,00	3,57	2,57	1,00	5,04	4,04
2,00	5,78	3,78	2,00	7,10	5,10
3,00	4,98	1,98	3,00	5,91	2,91
4,00	4,69	0,69	4,00	5,57	1,57
5,00	5,33	0,33	5,00	5,71	0,71
6,00	6,51	0,51	6,00	6,48	0,48
7,00	7,76	0,76	7,00	8,10	1,10
8,00	8,98	0,98	8,00	9,35	1,35
9,00	9,98	0,98	9,00	10,57	1,57
10,00	10,54	0,54	10,00	11,03	1,03
13,00	5,60	1,95	13,00	15,99	2,99
17,00	19,88	2,88	17,00	20,17	3,17
Genauigkeitskurve mit 3% Luft			Genauigkeitskurve mit 3,5% Luft		
Soll:	mittlerer Meßwert:	Differenz:	Soll:	mittlerer Meßwert:	Differenz:
[m³]	[m³]	[m³]	[m³]	[m³]	[m³]
1,00	6,92	5,92	1,00	4,28	3,28
2,00	8,60	6,60	2,00	3,22	1,22
3,00	6,68	3,68	3,00	2,46	-0,54
4,00	6,01	2,01	4,00	2,85	-1,15
5,00	5,99	0,99	5,00	5,37	0,37
6,00	7,07	1,07	6,00	7,47	1,47
7,00	8,51	1,51	7,00	8,53	1,53
8,00	9,57	1,57	8,00	10,12	2,12
9,00	10,61	1,61	9,00	10,90	1,90
10,00	10,94	0,94	10,00	11,04	1,04
13,00	16,94	3,94	13,00	16,92	3,92
17,00	20,62	3,62	17,00	20,65	3,65

Tabelle 12.02 Teil 1: Enthält die absoluten Abweichungen vom Sollwert

Genauigkeitskurve mit 4% Luft			Genauigkeitskurve mit 4,5% Luft		
Soll:	mittlerer Meßwert:	Differenz:	Soll:	mittlerer Meßwert:	Differenz:
[m³]	[m³]	[m³]	[m³]	[m³]	[m³]
1,00	9,61	8,61	1,00	9,89	8,89
2,00	9,36	7,36	2,00	9,37	7,37
3,00	7,43	4,43	3,00	8,14	5,14
4,00	6,50	2,50	4,00	6,23	2,23
5,00	6,61	1,61	5,00	6,74	1,74
6,00	7,89	1,89	6,00	8,08	2,08
7,00	9,26	2,26	7,00	9,46	2,46
8,00	10,47	2,47	8,00	10,48	2,48
9,00	10,93	1,93	9,00	11,04	2,04
10,00	11,11	1,11	10,00	10,98	0,98
13,00	17,45	4,45	13,00	18,26	5,26
17,00	21,04	4,04	17,00	20,43	3,43
Genauigkeitskurve mit 5% Luft			ohne Luft		
Soll:	mittlerer Meßwert:	Differenz:	Soll:	mittlerer Meßwert:	Differenz:
[m³]	[m³]	[m³]	[m³]	[m³]	[m³]
1,00	10,11	9,11	1,00	1,00	0,00
2,00	9,54	7,54	2,00	2,00	0,00
3,00	8,06	5,06	3,00	3,00	0,00
4,00	6,57	2,57	4,00	4,00	0,00
5,00	6,57	1,57	5,00	5,00	0,00
6,00	7,09	1,09	6,00	6,00	0,00
7,00	8,53	1,53	7,00	7,00	0,00
8,00	9,61	1,61	8,00	8,00	0,00
9,00	10,58	1,58	9,00	9,00	0,00
10,00	10,93	0,93	10,00	10,00	0,00
13	17,98	4,98			
17	19,03	2,03			

Tabelle 12.02 Teil 2: Enthält die absoluten Abweichungen vom Sollwert

m³			m³		
	Genauigkeitskurve mit 1% Luft			Genauigkeitskurve mit 1,5% Luft	
	Mittelwert	Durchschnitts- wert		Mittelwert	Durchschnitts- wert
1	1,04	3,85	1	1,06	5,59
2	1,05	4,75	2	1,08	8,08
3	1,07	6,73	3	1,1	9,92
4	1,05	5,32	4	1,07	7,46
5	1,03	3,15	5	1,04	4,3
6	1,02	1,81	6	1,02	2,48
7	1,01	0,88	7	1,01	1,39
8	1,01	0,52	8	1,01	0,88
9	1,01	0,67	9	1	0,18
10	1	0,19	10	1	0,15
13	1	0,15	13	1	0,11
17	1	0,11	17	1	0,09
			m³		
	Genauigkeitskurve mit 2% Luft			Genauigkeitskurve mit 2,5% Luft	
m³	Mittelwert	Durchschnitts- wert		Mittelwert	Durchschnitts- wert
1	1,07	7,32	1	1,07	7,11
2	1,14	13,57	2	1,15	14,64
3	1,13	13,16	3	1,16	15,6
4	1,1	9,79	4	1,12	11,72
5	1,05	5,19	5	1,07	6,84
6	1,01	9,79	6	1,01	1,13
7	1	-0,1	7	1	-0,1
8	1	0	8	1	0
9	1	0,21	9	1	0,03
10	1,01	1,44	10	1	-0,24
13	1,01	1,22	13	1	-0,22
17	1,01	1,16	17	1,01	0

Tabelle 12.3 Teil 1: Enthält die Dichteabweichungen bei verschiedenen Massenströmen

m³			m³		
	Genauigkeitskurve mit 3% Luft			Genauigkeitskurve mit 3,5% Luft	
	Mittelwert	Durchschnitts- wert		Mittelwert	Durchschnitts- wert
1	1,09	9	1	1,1	9,57
2	1,21	20,52	2	1,24	23,64
3	1,19	19,38	3	1,23	22,86
4	1,13	12,99	4	1,15	14,95
5	1,07	6,67	5	1,06	6,5
6	1,02	1,99	6	1,03	3,24
7	1	0,03	7	1,03	1,88
8	1	0,31	8	0,99	0,44
9	1	0,1	9	1	-0,23
10	1	0,07	10	1	-0,17
13	1,01	0,03	13	1	-0,11
17	1,01	0,1	17	1,01	0,11
m³			m³		
	Genauigkeitskurve mit 4% Luft			Genauigkeitskurve mit 4,5% Luft	
	Mittelwert	Durchschnitts- wert		Mittelwert	Durchschnitts- wert
1	1,11	10,79	1	1,1	10,31
2	1,26	26,17	2	1,29	28,7
3	1,23	22,95	3	1,22	22,41
4	1,13	13,11	4	1,14	14,46
5	1,03	6,43	5	1,03	5,8
6	1,06	3,16	6	1,05	1,84
7	1,01	1,03	7	1	0,43
8	1,01	0,63	8	0,97	-2,6
9	1	0,31	9	1,01	1,13
10	1,01	1,1	10	1	-0,14
13	1,01	0,98	13	1	-0,11
17	1	1,01	17	1,01	-0,03

Tabelle 12.3 Teil 2: Enthält die Dichteabweichungen bei verschiedenen Massenströmen

m ³		
	Genauigkeitskurve mit 5% Luft	
	Mittelwert	Durchschnittswert
1	1,12	12,45
2	1,33	33,07
3	1,28	27,69
4	1,13	3,02
5	1,06	5,79
6	1,01	1,27
7	0,99	-0,56
8	0,98	-2,16
9	0,97	-3,08
10	0,97	-3,24
13	0,95	-3,32
17	0,92	-2,58

Tabelle 12.3 Teil 3: Enthält die Dichteabweichungen bei verschiedenen Massenströmen

12.4 Zeichnungen

12.4.1 Elektroschaltplan

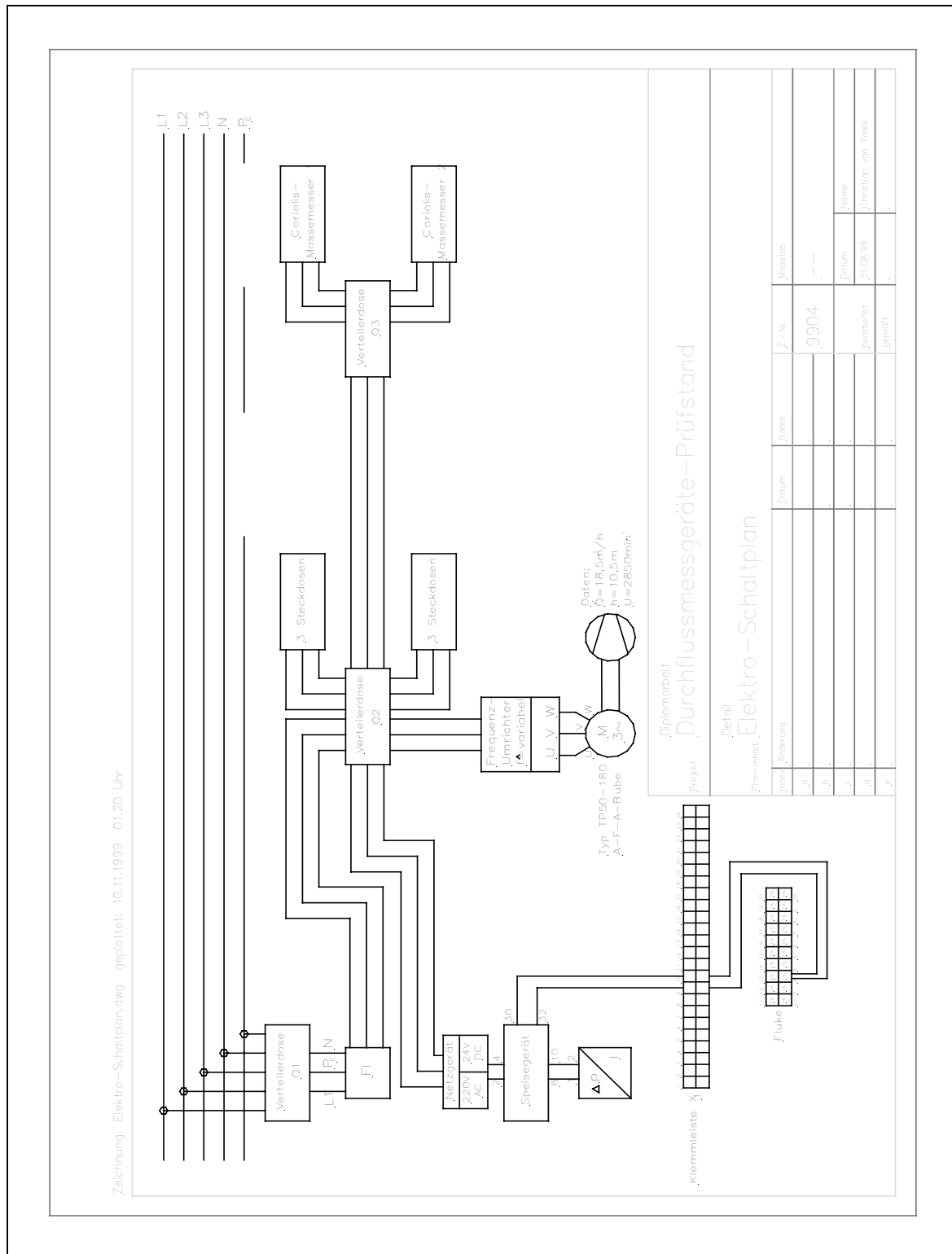


Bild 12.01: Schematische Darstellung des Elektroschaltplans der Versuchsanlage

12.4.2 Klemmleistenplan

